

多差路交通信号の実時間 確率的最適制御に関する研究

崔 成優

2013 年 2 月

早稲田大学審査学位論文（博士）

多差路交通信号の実時間
確率的最適制御に関する研究

崔 成優

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

2013 年 2 月

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	2
1.2 研究目的	4
1.3 論文構成	5
第 2 章 交通信号制御問題	8
2.1 交通信号制御の基礎知識	9
2.1.1 交通信号制御の基本制御パラメータ	9
2.1.2 交通信号制御の目的とメカニズム	12
2.2 制御性能の評価指標	13
2.2.1 渋滞長	13
2.2.2 平均速度	13
2.2.3 遅れ時間	13
2.3 従来の交通信号制御法とその問題点	14
2.3.1 定周期制御方式	14
2.3.2 感応制御方式	15
2.3.3 適応制御方式	15
2.4 交通信号の実時間確率的最適制御の考え方	19
第 3 章 セル・オートマトン (CA) 交差点交通流モデル	21
3.1 はじめに	22
3.2 セル・オートマトン (Cellular Automaton)	23
3.2.1 基本交通流モデルの Rule-184	23
3.2.2 従来の CA 交通流モデル	24
3.3 CA 交差点交通流モデルの構築	27
3.3.1 流入・流出部の設定	28
3.3.2 移動ルール	30
3.4 交通流入・流出量の事前確率分布の算出法	31
3.5 CA 交差点交通流モデルを用いたマイクロシミュレータの構築	34
3.6 CA 交差点交通量モデルの評価	37
3.6.1 車両挙動	38

3.6.2 交通流入・流出量推定値の評価	40
3.7 まとめ	42
第4章 十字路交差点における実時間交通信号制御	43
4.1 はじめに	44
4.2 十字路交差点における交通渋滞量確率分布最適化問題の定式化.....	45
4.2.1 十字路交差点交通量 BN 確率モデルによる渋滞量確率分布の算出	45
4.2.2 交通流入・流出量の事前確率分布の更新	47
4.2.3 交通渋滞量確率分布最適化問題の定式化	47
4.3 最適交通信号現示の探索	48
4.3.1 Particle Swarm Optimization (PSO)	48
4.3.2 PSO を用いた最適交通信号現示の探索	52
4.4 シミュレーション	54
4.4.1 測定データとマイクロシミュレータの設定	55
4.4.2 従来法の設定	57
4.4.3 シミュレーション1: PSO と GA による探索時間の比較	58
4.4.4 シミュレーション2: 従来の交通信号制御法との比較.....	60
4.5 まとめ	67
第5章 多差路交差点における実時間交通信号制御	68
5.1 はじめに	69
5.2 多差路交差点交通量 BN 確率モデルの構築と交通渋滞量確率分布最適化問題の定式化	70
5.2.1 多差路交差点交通量 BN 確率モデルの構築	70
5.2.2 交通流入・流出事前確率分布の更新	72
5.2.3 多差路交差点交通渋滞量確率最適化問題の定式化	73
5.3 H-GA-PSO アルゴリズムと最適交通信号現示の探索	75
5.3.1 階層型 PSO (H-PSO)	75
5.3.2 H-GA-PSO アルゴリズム	79
5.3.3 H-GA-PSO アルゴリズムを用いた最適交通信号の探索	83
5.4 シミュレーション	85
5.4.1 測定データとマイクロシミュレータの設定	85
5.4.2 従来法の設定	88
5.4.3 シミュレーション1: H-GA-PSO アルゴリズムの検討	88

5.4.4 シミュレーション 2 : H-GA-PSO と従来 PSO、 GA との比較.....	90
5.4.5 シミュレーション 3 : 従来 of 交通信号制御法との比較.....	93
5.5 まとめ	100
第 6 章 結論	102
参考文献	105
謝辞	111
研究業績	112
付録	115

目 次

Fig.2.1 Intersection types	9
Fig.2.2 Signal phases of a T-junction	9
Fig.2.3 Signal phases of a crossroad intersection	10
Fig.2.4 Signal phases of a multi-way intersection	10
Fig.2.5 Cycle length and split	11
Fig.2.6 Offset	11
Fig.2.7 Delay time	13
Fig.2.8 Structure of distributed control based on empirical equations	17
Fig.2.9 Structure of distributed control based on fuzzy concept	17
Fig.2.10 Structure of distributed control based on neural network	18
Fig.2.11 Structure of distributed control based on traffic flow model	18
Fig.2.12 Main idea for proposed method	20
Fig.3.1 Simple cellular automaton traffic model (Rule-184)	24
Fig.3.2 Asymmetric Simple Exclusion Process (ASEP) model	24
Fig.3.3 Fukui Ishibashi (FI) model	25
Fig.3.4 Slow Start (SIS) model	25
Fig.3.5 Quick Start (QS) model	26
Fig.3.6 Nagel Schrechenberg (NS) model	27
Fig.3.7 Example for cell setting of road	27
Fig.3.8 Example for inflow	29
Fig.3.9 Example for outflow	30
Fig.3.10 Example for movement	31
Fig.3.11 Relation of traffic flow and traffic signal	32
Fig.3.12 Flowchart of micro simulator	35
Fig.3.13 Monitor of simulator	37
Fig.3.14 Traffic flow com with different density	38
Fig.3.15 Speed com with different density	39
Fig.3.16 Speed com with different traffic flow	39
Fig.3.17 Map of Tutuimachi intersection	40
Fig.3.18 Comparison of outflows (Straight)	41

Fig.3.19 Comparison of outflows (Left turn).....	41
Fig.3.20 Comparison of outflows (Right turn).....	42
Fig.4.1 Structure of proposed real-time traffic signal control method for cross road	44
Fig.4.2 Crossroad intersection.....	45
Fig.4.3 Bayesian Network (BN) model for crossroad intersection.....	46
Fig.4.4 Calculation signal time for k cycle	48
Fig.4.5 Location updating.....	49
Fig.4.6 Procedure of PSO	50
Fig.4.7 Search space and particle	52
Fig.4.8 Procedure of optimal traffic signal searching using PSO	53
Fig.4.9 Tutuimachi crossroad intersection	55
Fig.4.10 Example of a chromosome encoding	57
Fig.4.11 Fitness with generation of PSO and GA	59
Fig.4.12 Probabilistic distributions of standing vehicles	61
Fig.4.13 Prior probabilistic distributions of inflows and outflows	62
Fig.4.14 Position with generation.....	62
Fig.4.15 Fitness with generation	63
Fig.4.16 Comparison of traffic signals	64
Fig.4.17 Number of standing vehicles on main road.....	65
Fig.4.18 Mean delay time of each cycle	66
Fig.5.1 Structure of proposed real-time traffic signal control method for r-way intersection	69
Fig.5.2 r-way intersection	71
Fig.5.3 Bayesian Network (BN) model for r-way-road intersection	71
Fig.5.4 An example of a CA model for 6-way intersection	73
Fig.5.5 Calculation signal time for k-cycle	75
Fig.5.6 Simple PSO (Global best model)	76
Fig.5.7 Hierarchical-PSO (Local best model).....	76
Fig.5.8 Structure of Hierarchical-PSO	77
Fig.5.9 Procedure of Hierarchical-PSO	78
Fig.5.10 Genetic Algorithm (GA) updating of position of the particle	80
Fig.5.11 Procedure of GA updating of position of the particle	81
Fig.5.12 Concept of initialization	82
Fig.5.13 Procedure of initialization rule	83

Fig.5.14 Procedure of traffic signal searching using H-GA-PSO algorithm	84
Fig.5.15 Ijirimutsukado 6-way intersection	86
Fig.5.16 Fitness with generation of each method	89
Fig.5.17 Fitness with generation of each method	92
Fig.5.18 Mean fitness and standard deviation of each method	92
Fig.5.19 Probabilistic distribution of traffic queue from road 1 to road 6 at 2th cycle	93
Fig.5.20 Probabilistic distribution of traffic queue from road 1 to road 6 at 5th cycle	93
Fig.5.21 Priori probabilistic distributions of traffic inflow and outflow of each road at optimal signal	94
Fig.5.22 Prior probabilistic distribution of traffic inflow and outflows of road 1 at pre-timed signal and optimal signal	95
Fig.5.23 Position with generation	95
Fig.5.24 Fitness with generation	96
Fig.5.25 Traffic signal by proposed method using H-GA-PSO algorithm	96
Fig.5.26 Mean speed of each method	97
Fig.5.27 Delay time of each method	98
Fig.5.28 Comparison of mean traffic queue length of each road	98
Fig.5.29 Comparison of mean traffic queue length (Total)	99
Fig.5.30 Comparison of mean speed	99
Fig.5.31 Comparison of total delay time	100

表 目 次

Table 3.1 Rule 184	23
Table 3.2 Comparison of inflows and outflows	40
Table 3.3 Comparison of travel direction	41
Table 4.1 Traffic signal parameters	56
Table 4.2 Actual traffic data	56
Table 4.3 Parameters of micro simulator.....	56
Table 4.4 Parameters of fitness function	57
Table 4.5 Parameters of Adjusting algorithm	58
Table 4.6 Comparison of calculation time	59
Table 4.7 Comparison of Performance Index (PI)	66
Table 5.1 Traffic signal parameters	87
Table 5.2 Actual traffic data	87
Table 5.3 Parameters of simulator	88
Table 5.4 Parameters of fitness function	88
Table 5.5 Comparison of fitness for the different particle size	89
Table 5.6 Comparison of proposed PSO and H-PSO	90
Table 5.7 Fitness values for degree of traffic congestion	91
Table 5.8 Performance Index of each traffic signal control method	97

第 1 章

序論

1.1 研究背景

近年、都心部を中心に生じる交通渋滞は、時間消耗による経済的な損失や排気ガスによる大気汚染、騒音など、大きな社会的問題となっている。国土交通省の 2003 年度資料によると、日本で渋滞による損失時間は一人当たり年間約 30 時間で、費用に換算すると約 12 兆円にも上がる。また、アメリカの大都市圏で渋滞による損失時間は、一人当たり年間約 62 時間で、毎年交通渋滞により 631 億ドルの経済損失が生じているというアメリカテキサス州の運輸研究所が発表した研究報告（2005 年）もある。また、2004 年に中国北京で行われた交通渋滞に関する研究によると、交通渋滞による損失は北京地域の経済総量の 3.6%に相当する報告もある。一方、1 車両当たりの排気ガスは、単位距離当たりの平均旅行時間にはほぼ比例して増加するので、交通渋滞時には多量の排気ガスが発生する。それ以外にも、交通事故の増加や燃料資源のロスなどが生じるので、現代社会における交通渋滞の軽減は急務となっている。

交通渋滞は、交通の需要量（道路の交通容量）が供給量（交通量）を超えたときに発生する [1]。従って、交通渋滞の原因として、需要側の交通容量低下と供給側の交通量増加に大別される。供給側において、車両保有台数の急激な増加は、交通量の増加に即反映されている。世界の自動車、及びトラックに関するデータなどを分析しているアメリカの Wardsauto 社によると、1970 年まで世界自動車保有台数は約 2.5 億台だったが、1986 年には倍増して 5 億台、2010 年には 10.15 億台がある。更に、2050 年には、25 億台を突破すると予測している。一方、道路の交通容量を低下させる原因には、交差点部や合流部、トンネル部、サグ部、カーブ区間、織り込み区間、道路工事、事故、災害などがある [1]。その中でも都心部での交通渋滞は、殆ど交差点部で発生し、特に枝路が 5 本以上である多差路交差点では渋滞が発生しやすい。一般に交差点は、T 字路と十字路、多差路交差点に分類できる。多差路交差点は、十字路交差点に比べてその数は少ないが、交通量が多く、交通信号現示が複雑なので、渋滞のポイントになっている。

このような都心部の十字路交差点、及び多差路交差点における交通渋滞の解消法としては、交通流入量を減少させる手法と道路の交通容量を増加させる手法に分けられる。交通流入量を減少させる手法には、道路情報システム（電子看板、カーナビなど）による道路交通情報の提供や交通規制がある。これらの手法は、混雑度が高い道路やエリアへ移動する車両を減らすのが目的である。しかしながら、既に発生した交通渋滞の悪化を避けるだけである。一

方、交通容量を増加させる手法として、道路の拡張や交差点構造の改良、交通信号制御などがある。しかし、都心部での道路の車線増設や交差点の立体化などは、長い工事期間と高いコスト、更に、周辺環境の影響により簡単には実施できない。そこで、直接的に交差点の各道路での交通量を制御し交通容量を最大に利用することで、交通渋滞を解消する交通信号制御が最も適切と考えられる。

現在殆どの交差点交通信号で用いられている交通信号制御手法は、定周期信号制御方式である。この定周期信号制御方式は、事前に過去の交通量データと経験則により、信号現示長を作成し、そのタイムスケジュールに従って信号制御を行う。代表的な経験則として Webster 公式がある [2]。しかしながら定周期信号制御は、交通信号パラメータが固定のため、変動する交通量に適応できない問題点がある。

これに対して適応交通信号制御方式は、感知器により測定された交通データに基づき交通信号を制御する。この適応交通信号制御方式は、集中型制御と分散型制御に分類できる。現在、一部の都市では、集中型制御方式が実用化されている。例えば、イギリスの SCOOT [3]、オーストラリアの SCATS [4]、イタリアの OPAC [5] などがある。しかし、集中型制御方式は、広域での信号機の交通信号を一括で制御するため、膨大なデータの送受信や処理が必要なので、長い計算時間を要する。従って、交通信号制御パラメータの更新周期が長くなり、サイクル毎に信号現示を調整する実時間制御の実現は困難である。更に、これらのシステムは、予め設計した幾つかの交通信号パターンから選択する方式なので、そのときの交通状況に対して必ずしも最適化を行っているとは言えない。

近年、交通信号の実時間制御を実現するために、各々の信号機を独立に制御する分散型制御方式に関する研究が進められ、幾つかの手法が提案されている。経験則を用いた制御法 [6] は、計算が簡単のため実時間制御は可能であるが、道路によって飽和交通量や車両の平均速度などが異なるため、最適な交通信号制御パラメータの算出は難しい。また、交通流モデルを用いて車両群の移動を推定し、車両の停止回数や遅れ時間などによって設計した評価指標が最小となるように交通信号を制御する方法 [7] - [11] もあるが、道路毎に交通流の速度や拡散状態が異なり、正確な推定は困難である。最近、Fuzzy 論理や Neural Network (NN) 法を用いた交通信号制御法が試みられている。しかしながら、Fuzzy 論理に基づいた手法 [12] - [16] は適切な Fuzzy ルールの設定が、また、NN を用いた手法 [17] - [22] は学習データ

の取得が困難である。更に、交通流量のパターンが変化した場合は、各パラメータを再設定する必要がある。強化学習を用いた交通信号制御法 [23] - [27] も提案されているが、学習時間が長く、交通流量パターンの変化により、再学習する必要がある。停車量確率分布に基づく交通信号調整法 [28] は、望ましい確率分布になるように交通信号の制御パラメータを調整する方法である。この手法は、事前確率分布の更新において、道路交通状況による影響と交通流入量については考慮しておらず計算時間が長いので、実時間制御の実現には至っていない。これに対して、交通信号調整法による結果を学習データとした Back Propagation Neural Network (BPNN) を用いた実時間交通信号制御法 [30] も提案されているが、交通流量のパターンが変化した場合に再学習する必要がある、学習データの取得時間が長い欠点がある。

一方、これらの研究は十字路交差点を対象とし、多差路交差点における交通信号の制御法については考慮していない。そこで、時々刻々不規則に変動する交通量を考慮し、十字路交差点のみならず多差路交差点における交通信号を実時間に制御する新たな手法が必要となる。

1.2 研究目的

本研究の目的は、実際の交通量は時々刻々不規則に変動することを考慮し、交通渋滞量確率分布最適化によって、十字路交差点のみならず多差路交差点まで対象とした交通信号の実時間確率的最適制御法を確立することである。そのためには、以下の3つの課題を解決する必要がある。

課題 1) 交通量の不規則変動を考慮した十字路交差点のみならず多差路交差点の渋滞軽減問題を、如何に定式化するか。

課題 2) 当該サイクルの交通渋滞量確率分布を予測するために、交通流入・流出量の事前確率分布を、如何に求めるか。

課題 3) 実時間交通信号制御を実現するために、当該サイクルの許容処理時間内で、如何に信号現示を探索するか。

課題 1 に対しては、まず、不規則に変動する交通流入量と流出量、及び渋滞量を確率変数

と見なして、これらの因果関係により多差路交差点交通量 Bayesian Network (BN) 確率モデルを構築し、予測された各道路での渋滞量確率分布に基づき、交通渋滞量確率分布最適化問題を定式化する。課題 2 に対しては、都心部交差点における交通流の特徴を考慮した人工生命の一つのモデルである Cellular Automaton (CA) 交差点交通流モデルを提案し、異なる交通信号時の交通流入・流出量を推定する。そして、この推定交通量と過去の測定交通量データに基づき事前確率分布を求める。課題 3 に対しては、実時間内に交通信号を決定するために、構造が簡単で処理速度が速い Particle Swarm Optimization (PSO) を基に、新たに階層型の H-GA-PSO アルゴリズムを提案し、交差点交通信号の実時間確率的最適制御法を明らかにする。

これら提案する実時間交通信号制御法の有効性を示すために、北九州市八幡西区筒井町の十字路交差点と福岡市南区井尻六つ角の 6 差路交差点において測定された交通データとマイクロシミュレータを用いてシミュレーションを行い、探索時間、評価値、渋滞量、平均速度、及び遅れ時間の評価指標による従来の手法との比較により、提案する CA 交差点交通流モデルと H-GA-PSO アルゴリズムによる交通信号制御法の有効性を示す。

1.3 論文構成

第 1 章では、本研究の背景と目的を述べ、論文構成について説明する。

第 2 章では、交通信号における基本制御パラメータと交通信号制御性能の評価指標について概説し、更に従来の交通信号制御法と問題点、及び提案法の考え方について述べる。

第 3 章では、交通流入・流出量を推定するための CA 交差点交通流モデルを提案し、推定交通量に基づく事前確率分布の算出法について述べる。一般に、交通流入量はサイクル長により、また、流出量は交差点残存車両台数と各信号現示長によって異なる。従って、課題 2 に対しては、交通流入・流出量の事前確率分布を、異なる交通信号時間長の推定交通量に基づき求める必要がある。そこで、都心部交差点交通流の特徴を考慮し、交通密度と車の位置によって異なる確率で加減速、車線変更、及び右左折する人工生命の一つのモデルである CA 交差点交通流モデルを新たに構築し、交通流入・流出量を推定すると共に、推定した交通流入・流出量と過去の測定交通データを用いて事前確率分布を算出する方法を提案する。この CA 交差点交通流モデルを用いてマイクロシミュレータを構築し、実データに基づき設定したシミュレータにより得られた交通流入・流出量の平均値と実データを比較し、CA 交差点

交通流モデルの妥当性を示す。

第 4 章では、一般的な十字路交差点を対象とし、交通渋滞量確率分布最適化ための実時間交通信号制御法について述べる。交通信号制御は、信号による影響で停止することなく走行した場合の旅行時間と実際の旅行時間との差である遅れ時間が小さくなるように、各信号現示の時間長を決定することがポイントである。遅れ時間は各信号現示及び交通量と緊密な関係があり、遅れ時間を減少させるためには、渋滞量と変動する交通量の情報を用いて渋滞量確率が小さくなる信号現示長を決定する確率制御が適切である。そこで、課題 1 の十字路交差点に対して、交通量が多い主道路での渋滞量確率分布を予測し、過多停車量以上渋滞量と過小停車量以下となる双方の確率、主道路での信号現示長、及びサイクル長との関係に基づく十字路交差点交通渋滞量確率分布最適化問題を定式化する。課題 3 に対しては、当該サイクルの許容処理時間内で最適信号現示を探索する最適化問題の解法が必要であり、構造が簡単で処理速度が速い Particle Swarm Optimization (PSO) を用いて最適化問題の解を求める。そこでは、各粒子が各信号現示の設定可能範囲によって構成された探索空間で移動しながら最適な位置（各信号現示の時間）を探索する。北九州市八幡西区の筒井交差点で測定した実データと、その実データにより設計したマイクロシミュレータを用いてシミュレーションを行い、提案法の有効性を示す。

第 5 章では、十字路交差点を拡張した多差路交差点における実時間交通信号制御法について述べる。課題 1 の多差路交差点において、全ての交通信号現示を制御するためには、複数の道路における渋滞量確率を考慮して交通渋滞最適化問題を定式化する必要がある。そこで、新たに多差路交差点交通量 BN 確率モデルを構築し、各道路での渋滞量確率分布を予測する。次に、予測渋滞量確率分布を用いて算出した各道路での渋滞量確率分布関数に基づき、多差路交差点における交通渋滞確率分布最適化問題を定式化し、最適な信号現示長を探索する。多差路交差点は、十字路交差点に比べ評価値の計算時間が長くなるので、PSO を用いて探索する場合、粒子数と探索回数が制限される。このような場合、PSO による探索は、局所解に陥る可能性が高くなる。一方、PSO を改良した階層型 PSO (H-PSO) による探索は、局所解に陥る可能性は低い、収束時間が長い問題がある。そこで課題 3 に対して、H-PSO を基に、収束速度を速めると共に局所解問題を回避できるように粒子の更新式を改良し、初期粒子生成法と GA 演算による粒子位置更新法を導入した H-GA-PSO アルゴリズムを提案する。福岡

市南区井尻六つ角 6 差路交差点で測定された実データとマイクロシミュレータを用いてシミュレーションを行い、提案法の有効性を示す。

第 6 章では、本論文で得られた結果をまとめ、今後の研究について展望する。

第 2 章

交通信号制御問題

2.1 交通信号制御の基礎知識

交通信号とは、交差する道路において、各道路での交通流を制御するための信号である。交通信号（時間）を制御することで、交差点での交通を円滑にし、交通事故も減少できる。適切な交通信号制御は、有効的に交通量を制御することで、交差する道路の交通容量を最大に利用して交通渋滞を軽減する。

2.1.1 交通信号制御の基本制御パラメータ

交通信号制御の基本制御パラメータとして、信号現示（Phase）、サイクル長（Cycle length）、スプリット（Split）、オフセット（Offset）がある [1]。

A. 交差点と信号現示

信号現示（Phase）とは、ある交差点道路において、交通流に交差点通過権を与える表示である。信号現示は、交差点の種類と交通量によって異なる。一般的に、交差点は図 2.1 に示すように、交差する道路の数により、T 字路、十字路と多差路交差点の 3 つの種類に分類できる。ここで図 2.1 に示すように、5 枝以上の道路が交差する交差点が多差路交差点である。多差路交差点は、十字路交差点に比べその数は少ないが、信号現示が複雑で交通量が多いため渋滞が発生しやすい。

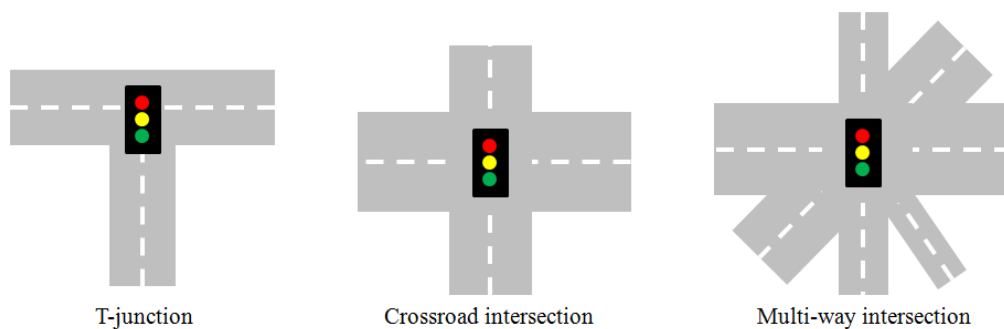


Fig.2.1 Intersection types

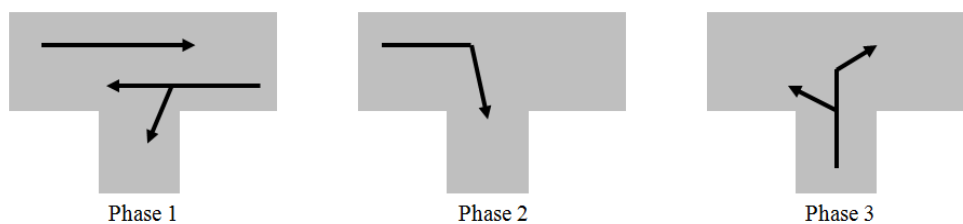


Fig.2.2 Signal phases of a T-junction

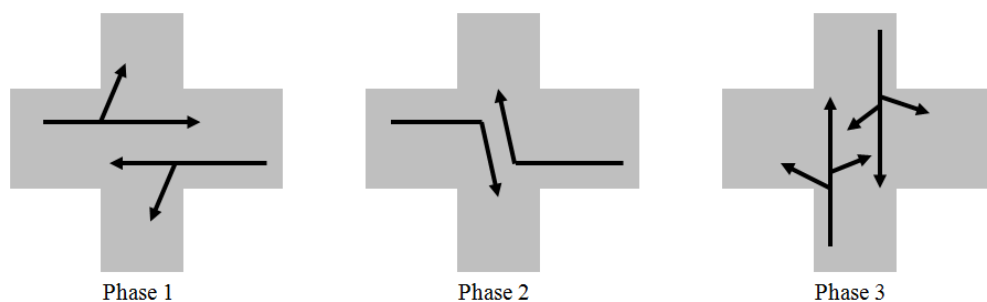


Fig.2.3 Signal phases of a crossroad intersection

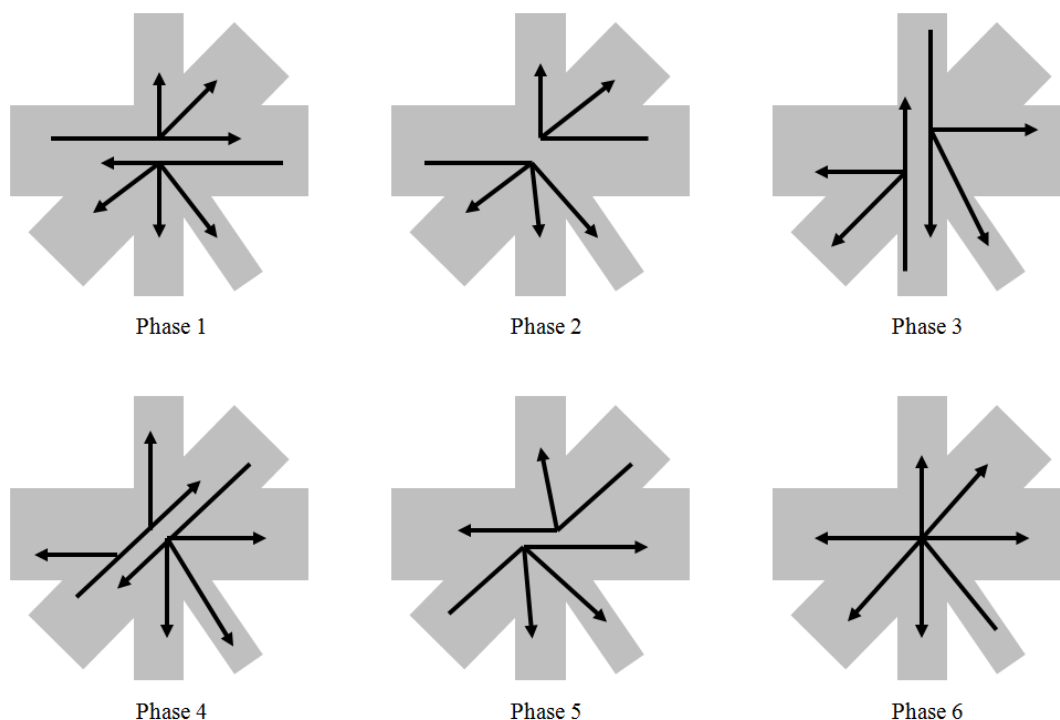


Fig.2.4 Signal phases of a multi-way intersection

ここで、信号現示の一例として、T 字路交差点と十字路交差点、及び多差路交差点での信号現示を、それぞれ図 2.2、2.3、2.4 に示す。このように、信号現示は、交差点の種類によって異なり、交差する道路が多くなると信号現示の種類も多くなる。また、各道路における交通量によっても異なる。図 2.3 の十字路交差点で、信号現示 1 と信号現示 2 は、東西方向において直進と左折車両、及び右折車両に通過権を与えることを意味し、信号現示 3 は、南北方向の車両に通過権を与えることを意味する。ここで、南北方向において、右折専用の信号現示は設けてない。これは、南北方向の道路は従道路なので、交通量が少ないか、或は右折車両が殆どないからである。右折車両が多い場合には、南北道路にも右折専用の信号現示を

設定する必要がある。一方、信号がある現示から次の現示に切り替わる時、安全性を考慮して対象道路では黄信号現示をとり、また、交差点の中を空にするため全方向を赤信号とする全赤信号現示がある。この黄信号現示と全赤信号現示の時間は、交差点の大きさにより異なる固定値である。

B. サイクル長とスプリット

サイクル長（Cycle length）とは、各信号現示が一巡する信号周期の所要時間である。図 2.5 のように、3 つの信号現示がある場合は、各信号現示長（時間）の合計時間がサイクル長である。スプリット（Split）は、サイクル長内各信号現示の分配比率で、一般的に百分率で表す。一般的にサイクル長は、40～180 秒に設定されることが多い。多差路交差点の場合は、信号現示の数が多く 180 秒以上になる場合が多い。スプリット（各信号現示長の設定）において、設定時間をあまり短くすると安全性に支障をきたすので最小設定可能時間が必要であり、最小設定可能時間は、道路における交通量により異なるが、交通量が非常に少ない場合でも 15 秒とし、右折専用時間は 5 秒とする場合が多い。

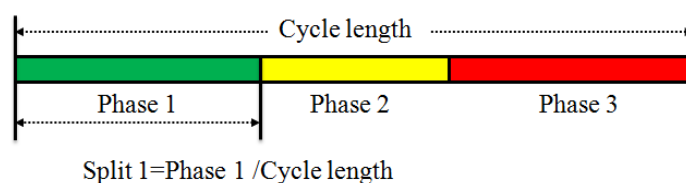


Fig.2.5 Cycle length and split

C. オフセット

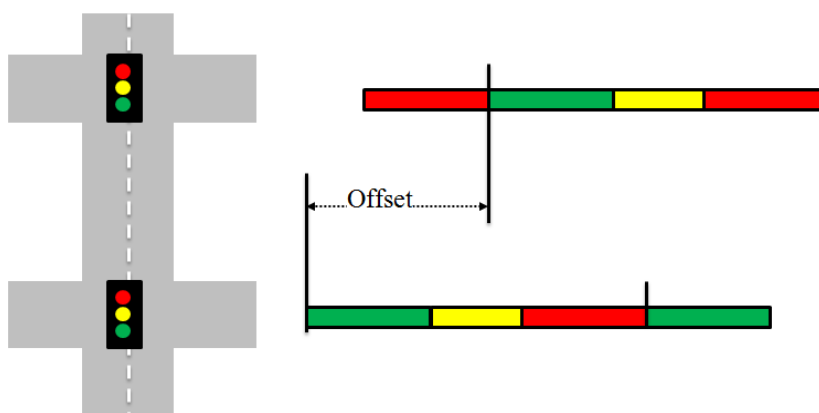


Fig.2.6 Offset

オフセット (Offset) とは、図 2.6 に示すように、隣接する信号機との信号が切り替わるタイミングのずれのことである。一般的には、交差点が緊密に並んで（連接交差点との距離が非常に近い場合）、一連の信号機群を関連づけて制御するときに、この制御パラメータを考慮する。この場合は、隣接する交差点でのサイクル長を統一する必要がある。

2.1.2 交通信号制御の目的とメカニズム

道路が交差する場合、交通量が多い道路、或は幹線道路を主道路、交通量が少ない道路或は主道路より格の低い道路を従道路と呼ぶ。主道路、従道路とも交通量が少ない場合は従道路の一時停止で交通が処理できるが、主道路の交通量が多くなると、従道路からの横断や右折が難しくなり交通が処理できなくなる。また、交差点では交通動線が錯綜し、交通事故が発生しやすくなる。実際、交通事故の半分以上は交差点で発生している。このため、交通量の多い交差点では、交通の円滑化と安全のため交通信号が必要になる [1]。

適切な交通信号の制御パラメータ設定により、道路の交通容量を最大に利用することで交通渋滞も軽減できる。反面、不適切な交通信号の制御パラメータは、交通容量を低下させる可能性がある。ある交差点において、黄信号現示と全赤信号現示のときは、車両を流せないロス時間になる。このロス時間は、サイクル長によらず一定なので、サイクル長が短くなるほどロス時間の割合が大きくなり流せる交通量が少なくなる。逆に、サイクル長が長くなると青信号現示（対象道路での車両に通過権を与える信号現示）が長くなり、通過する車両がなくなっても青信号現示し続けるロス時間が発生することがある。即ち、交通量が多い交差点においては、青信号現示を長くする（サイクル長も長くなる）方が交通容量としては有利である。しかし、あまり長くすると赤信号側の運転者がいらいらすること、赤信号側の右折車線が一杯になり交通容量が低下することなどデメリットが生じてくる。一方、交通量が少ない道路においては、通過車両がなくても青信号になるロス時間をなくすため、青信号現示長を短くする必要がある。そこで、交差点における道路の交通容量を最大に利用するためには、各信号現示の時間を各道路での交通量の変化に応じて、適切に設定する必要がある。特に、多差路交差点の場合は、信号現示の種類が多く、各道路での交通量レベルが異なり、更に、各道路における交通量の変動が不規則のため、各道路での交通量の不規則変動に応じて、各信号現示の時間を適切に調整する必要がある。

2.2 制御性能の評価指標

交通信号制御の性能について評価する指標として、渋滞長（或いは渋滞量）、交通通過量、平均速度、旅行時間、遅れ時間などがあり、この中で最も体系的な3つの指標を説明する。

2.2.1 渋滞長

渋滞長とは、交差点の道路における赤信号時の停止車列の長さである。渋滞長の代わりに、渋滞量（停止車両台数）で評価する場合もある。渋滞長が短いほど、或いは渋滞量（停車量）が少ないほど交通信号制御の効果が良いと判断できる。

2.2.2 平均速度

平均速度とは、一定の時間内に道路を通過した車両に対して計算した車両1台の平均速度である。速度が速いほど交通が円滑と見られ、交通信号制御の効果が良いと判断できる。

2.2.3 遅れ時間

遅れ時間（Delay time）とは、信号による影響で停止や減速を強いられることなく走行した場合の旅行時間と実際の旅行時間との差である。遅れ時間は、評価指標の中で最も重要な指標とされている。

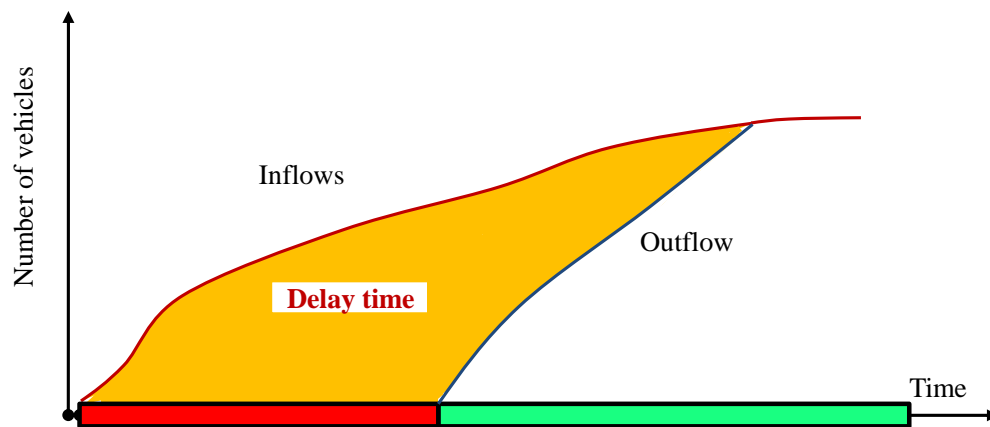


Fig.2.7 Delay time

その一例を図 2.7 に示す。交差点の遅れ時間は、流入量及び流出量と赤信号に囲まれた面積として表される。遅れ時間は、各信号現示の時間、及び交通量の変動と緊密な関係があり、遅れ時間が小さいほど交通信号制御の効果が良いと判断できる。

2.3 従来の交通信号制御法とその問題点

交通信号制御法は、制御方式によって、定周期制御方式と感応制御方式、適応制御方式に分類することができる。更に、適応制御方式は、制御範囲によって、集中型と分散型制御方式に分類することができる。

2.3.1 定周期制御方式

定周期制御方式とは、過去の交通データに基づき、経験則を用いて予め交通信号の制御パラメータを決定する方式である。代表的な経験則の計算公式は、Webster が提案したサイクル長とスプリットの計算式である [2]。最初、Webster は次のような遅れ時間算出公式を示した。

$$\bar{D}_t = \frac{Ct(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda Sd)} + \frac{x^2}{2Tf(1-Sd)} - 0.65\left(\frac{Ct}{Tf^2}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot Sd^{(2+5\lambda)} \quad (2.1)$$

$$\lambda = \frac{(phase^i - Lt)}{Ct} \quad (2.2)$$

\bar{D}_t : 車両 1 台の平均遅れ時間

Ct : サイクル長

Sd : 飽和度

Tf : 交通流量

Lt : 損失時間 (全赤時間など)

$phase^i$: 信号現示 i の時間

この式で、第 1 項は到達車両の均一性による遅れ時間、第 2 項は到達車両のランダム性による遅れ時間、第 3 項は実験による経験値である。第 3 項の値は、一般的には小さく考慮しない。更に Webster は、式 (2.1) と (2.2) を基に、次のようなサイクル長と信号現示長の計算公式を示した。

$$Ct_o = \frac{1.54t_{\bar{n}} + 5}{1 - Y} \quad (2.3)$$

$$Y = \sum Y_i = \sum \frac{Tf_i}{Mtf_s} \quad (2.4)$$

$$phase^i = \frac{Y_i(Ct_o - CLt)}{Y} + Lt \quad (2.5)$$

Ct_o : 最適サイクル長
 CLt : サイクル毎の損失時間
 Tf_i : 現示 i の交通流量
 MTf_s : 飽和交通流量
 Lt : 損失時間（全赤時間など）
 $phase_i$: 信号現示 i の時間

定周期制御のパラメータの計算は、国によって用いる計算公式は多少異なるが、一般には、式（2.3）、（2.4）、（2.5）のように、対象道路での交通流量と飽和交通流量、及び損失時間によって決定する。しかし、飽和交通流量は、道路と交差点の構造や周辺の環境などによって異なり、更に一回算出した制御パラメータは、ある特定の交通量しか対応できない問題点がある。そのため交通量の変動すると、制御パラメータを再計算する必要がある。

2.3.2 感応制御方式

感応制御方式は、車両感知器を用いて、実際の交通需要に応じ信号現示長を調整する方式である。感応制御方式には、半感応制御、全感応制御、右折感応制御方式がある。

半感応制御方式では、従道路側に車両感知器を設け、事前に設定した主道路側の青信号現示時間が終了しても、従道路側に車両が感知されるまで主道路側の青信号現示を継続する。半感応制御方式は、従道路側の交通量が非常に少ない場合に用いられる。

全感応制御方式では、主道路と従道路、双方向の流入部に感知器を設け、主道路側（或は従道路）の信号現示が終了しても、従道路（或は主道路）側に車両が感知されていなければ、事前に設定された単位追加時間だけ延長される。交差する道路の交通量がほぼ等しい交差点に用いられるが、適切な感知器の配置場所を選択するのが困難である。

右折感応制御方式では、右折車線に感知器を設け、右折車両の量に基づき、右折専用信号現示長を調整する。一般的に、右折車両が多く時間的に変動する交差点で用いられる。

このように感応制御方式は、特別な状況に対応し、特定の信号現示しか調整できない。一般の交差点において、全ての信号現示について適切な制御を行うためには、交通量や交通状況について予測しながら、交通信号の制御パラメータを調整する必要がある。

2.3.3 適応制御方式

適応制御方式は、測定された交通量や渋滞長などの交通情報を用いて、将来の交通量や交

通状況を予測しながら適切に交通信号を制御する方式である。この適応制御方式は、集中型と分散型の制御方式に分けられる。集中型制御方式は、広域の信号機に対して一括に制御する方式で、分散型制御方式は、各々の信号機を独立に制御する方式である。

A. 集中型制御方式

集中型制御方式では、中央コンピュータにより統括される集中制御を行う。道路や交差点の流入部と流出部に設置したセンサーにより測定された交通量や占有率などの交通情報に基づき、適切な交通信号の制御パラメータを求めて、広域の信号機群を一括して制御する。

現在、実用化されているシステムとして、イギリスの **SCOOT** [3]、オーストラリアの **SCATS** [4]、イタリアの **OPAC** [5] などがあり、アメリカの場合は、地域別に異なるシステムを採用している。日本の場合は、主に **SCATS** のようなパターン選択式を用いている。これらのシステムは、**SCOOT** のような評価指標の最適化による制御方式と、**SCATS** のようなパターン選択方式に分類できる。**SCOOT** システムは、測定交通量情報を用いた **TRANSTY** 交通モデル [32] に基づき、将来の交通状況を予測しながら、遅れ時間と車両の停止回数などにより設計された評価指標の **Performance Index (PI)** が最小になるような交通信号の制御パラメータを計算する。**SCATS** システムは、道路での車両占有率に基づき、事前に設計した幾つかの交通信号の制御パラメータ・パターンから選択する。

集中制御方式は、制御エリア全体の交通量を適正化することは可能であるが、膨大な情報の送受信と計算処理が必要のため、実時間制御が困難である。また、一部の通信回線や制御システムの故障、交通網の変更などにより制御システム全体が影響を受け、その度に制御システムの再構築が必要になる問題点がある。

B. 分散型制御方式

分散制御方式では、各々の信号機近傍の局所エリアにおける測定交通情報に基づき、適切な交通信号パラメータを計算する。そのため、集中制御方式に比べて計算に必要な情報が少なく、実時間制御が実現できる。また、システムの拡張性にも優れ、大規模道路網における実時間制御を実現するのに有効である。近年、様々な分散型制御法が提案され、主に二つのパターンに分けられる。

一つ目のパターンは、適切なルールベースを作成し、測定交通量に対応する交通信号を出す手法である。このようなルールベースの作成には、経験則、Fuzzy 論理、Neural Network

(NN)、強化学習 [23] - [27] など手法が用いられている。

経験公式を用いた手法 [6] は、測定交通データが得られる度に、Webster の式 (2.3) ~ (2.5) のような経験公式を用いて交通信号の制御パラメータを更新する。その構造を図 2.8 に示す。この制御法は、計算が簡単のため実時間制御が実現できるが、飽和流量や損失時間などは道路によって異なるため、適切な信号パラメータの算出は難しい。

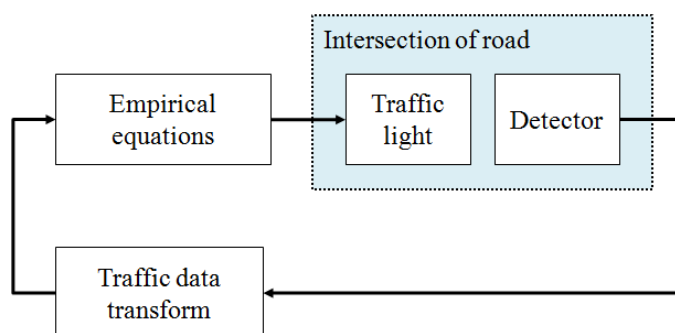


Fig.2.8 Structure of distributed control based on empirical equations

Fuzzy 論理を用いた手法 [12] - [18] は、適切な Fuzzy ルールにより、測定された交通量や渋滞長などの交通状況情報に対応できる制御パラメータを算出する。近年、Fuzzy 論理を用いた様々な制御法が提案され、それぞれの入力の交通情報と Fuzzy ルールなどが異なるが、全体的な考え方は同じである。その構造を図 2.9 に示す。この制御法は、Fuzzy ルールに大きく依存するため、適切なルールの設定がとても重要である。しかし、そのルールの設定が難しく、更に、交通パターンが変化すると、ルールを更新する必要がある。

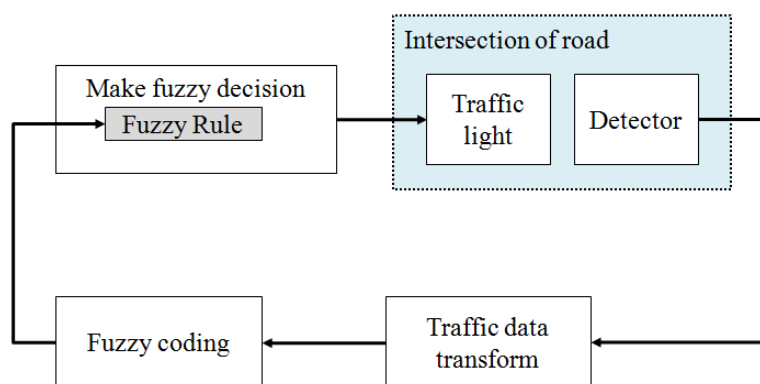


Fig.2.9 Structure of distributed control based on fuzzy concept

Neural Network (NN) を用いた手法 [19] - [22] は、図 2.10 のように、測定された交通量や渋滞長などの交通状況情報を入力値とし、交通信号の制御パラメータを出力値とする。そして、適切な学習アルゴリズムにより重み係数を調整する。しかし、学習データの取得は難しく、更に、交通パターンが変化すると、再学習する必要がある。

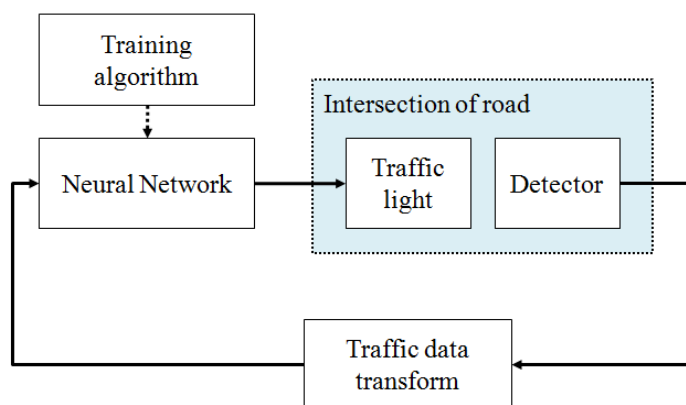


Fig.2.10 Structure of distributed control based on neural network

二つ目は、交通量と交通信号間の関係により適切な評価指標を作成し、その評価指標の最適化によって、交通信号を求める手法である。この手法 [7] - [11] は、適切な交通流モデルを用いて流入部からの車両群の動きを予測しながら、遅れ時間や車両の停止、渋滞長などを用いて設定した評価指標の最適化により適切な制御パラメータを算出する。ここで用いる交通流モデルには、TRANSTY 交通流モデルが知られており、流入口から拡散しながら移動する車群を推定する。

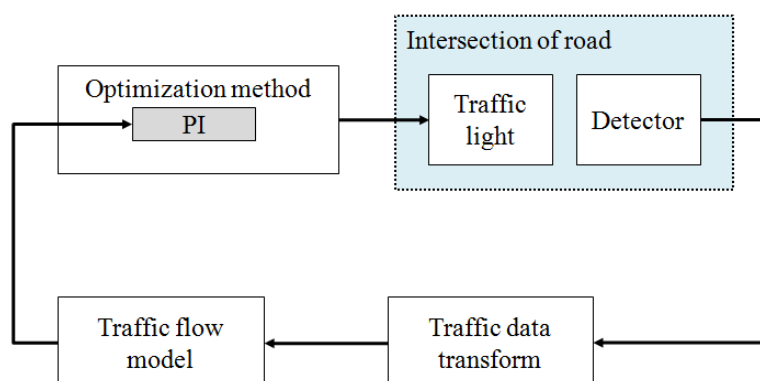


Fig.2.11 Structure of distributed control based on traffic flow model

制御パラメータの探索においては、動的計画法、Particle Swarm Optimization 法 (PSO)、Genetic Algorithm (GA) などの最適化手法が用いられている。その構造を図 2.11 に示す。しかし、道路毎に交通流の速度や拡散の状態が異なり、交差点間の横道からの流入車両がある場合は、正確な交通量の推定値を得るのは困難である。更に、交通量の不規則変動を考慮していない問題がある。評価関数を渋滞状態と通常状態間の遷移確率で扱った手法 [29] もあるが、停車量確率分布をポアソン分布と仮定してものの、一定時間内で固定としている。

このようにルールベース式は、適切なルールベースの作成が難しく、更に交通パターンが変化すると再設定する必要がある。これに比べ、渋滞量の最適化によって適切な交通信号を求める手法は、交通パターンなどが変化した場合でも再設定が必要ない。しかし、交通流モデルを用いて評価値を推定するとき、交通量の不規則な変動を考慮していない問題点がある。一方、これらの研究は、十字路交差点のみを研究対象とし、多差路交差点については考慮していない。また、各手法において、多差路交差点への拡張は、簡単ではない。例えば、Fuzzy 論理や NN を用いた制御を多差路交差点へ拡張しようとする、Fuzzy ルールの設定や学習データの取得は、より難しくなる。そこで、交通量の不規則な変動を考慮した十字路のみならず、多差路交差点でも適用できる交通信号制御法が必要である。

2.4 交通信号の実時間確率的最適制御の考え方

十字路と多差路交差点における各道路において交通流入量と流出量、渋滞量が不規則に変動する状況で、適切な交通信号現示により渋滞量を軽減する必要がある。そのためには、交通量の不規則な変動を確率的に評価し、信号現示と交通量の関係に基づき交差点における交通渋滞問題を適切に定式化する必要がある。本研究では、離散単位を [cycle] とした場合、交通流入量と流出量、及び渋滞量の間の因果関係に着目し、これらの変数を確率変数と見なし、この因果関係に基づいて交差点交通量 BN 確率モデルを構築する。そして、交差点交通量 BN 確率モデルによる予測渋滞量確率分布と信号現示長間の関係に基づく交通渋滞問題を定式化する。ここで、十字路交差点においては、信号現示の種類が少ないため、主道路のみでの予測渋滞量確率分布を用いて定式化できる反面、多差路交差点において、信号現示の種類が増加するため、複数の道路での予測渋滞量確率分布を用いて定式化しなければならない。また、交差点道路における渋滞量確率分布を予測するためには、交通流入量と流出量の事前確率分布を更新する必要がある。交差点道路における交通流入量と流出量は、信号現示と対

象道路での渋滞量によって変動する。従って、交通流入量と流出量の事前確率分布は、異なる信号現示と道路交通状況の下での推定交通量に基づき更新する必要がある。そこで、本研究では、CA 交差点交通流モデルを新たに構築して交通流入と流出量を推定すると共に、推定交通量に基づく事前確率分布の更新法を提案する。

一方、この交通渋滞量確率分布最適化問題を解いて最適な交通信号を求めるためには、適切な最適化手法が必要となる。提案する交通信号制御法は、サイクル毎に交通信号を更新するため、最初の信号現示の最小設定可能時間内で最適な交通信号現示を決定しなければならない。そこで、本研究では実時間制御を実現するために、実装が簡単で処理速度が速い PSO 法を用いて十字路交差点の最適な交通信号現示を探索する。更に、多差路交差点の場合は評価値の計算量が増大するため、新たに提案する H-GA-PSO アルゴリズムを用いて最適な交通信号現示を探索する。このような交通信号の実時間確率的最適制御法の考え方を、図 2.12 に示す。

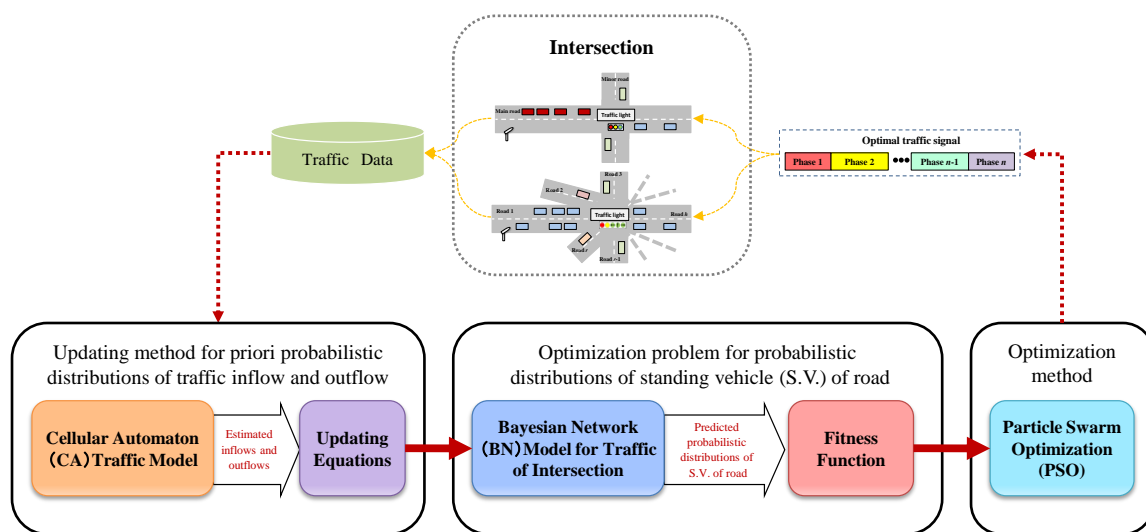


Fig.2.12 Main idea for proposed method

第 3 章

セル・オートマトン (CA) 交差点交通流モデル

3.1 はじめに

本研究で提案する交通信号の実時間確率的最適制御法は、交差点における交通渋滞量確率分布最適化により最適な交通信号現示長を求める。渋滞量確率は、渋滞量と交通流入・流出量の因果関係に基づき構築した交差点交通量 Bayesian Network (BN) 確率モデルを用いて予測した渋滞量確率分布により算出する。このとき、渋滞量確率分布を予測するためには、交通流入・流出量の事前確率分布を推定しなければならない。一般的に、交通流入量はサイクル長の長さにより、交通流出量は予測する時点の道路交通状況と各信号現示の時間長によって異なる。そこで、交通流入・流出量の事前確率分布は、交通流入・流出量を推定し、その推定値に基づき算出する必要がある。交通量を推定するためには交通流モデルが必要であり、交通流モデルは、流体モデル、追従モデル、セル・オートマトン (Cellular Automaton) の3つに分類できる。

流体モデルは、個々の車の動きや厳密な台数ではなく、道路上で車の密度がどのように移り変わるかに注目したモデルである。計算量が少ないため数 10 [km] 四方に及ぶ広い道路網を対象とした巨視的なシミュレーションに用いられる場合が多い。

追従モデルは、個々の車が前方の車から受ける刺激をもとに加減速する様子を表すことで、交通流の振る舞いを捉えるモデルである。個々の車の詳細な動きを再現でき、数 [km] 四方面程度の狭い道路網での微視的なシミュレーションに適している。

CA 交通流モデルは、CA モデルを用いて交通流を再現したモデルである。個々の車の動きを表現しているという点は追従モデルと同じであるが、時間や車の速度などを離散化して表現するので、追従モデルよりも計算量が少ない利点がある。更に、実際の道路の配置に対して、車線変更や合流分岐などをモデルに組み込みやすい利点がある。

これらの交通流モデルの特徴を考慮して、本研究では、実時間制御を実現するための処理速度が速く、更に都心部の交通流の特徴を再現できるように、車線変更や合流分岐などを細かい設定が可能な CA 交通流モデルを用いて、異なる信号現示ときの交通流入・流出量を推定する。

本章では、都心部交差点交通流の特徴を考慮した CA 交差点交通流モデルの構築と、推定交通量に基づく事前確率分布の予測法を示す。次に、CA 交差点交通流モデルを用いてマイクロシミュレータを作成すると共に、CA 交差点交通流モデルによる車両挙動について検討

し、推定した交通流入・流出量と実データとを比較検討する。

3.2 セル・オートマトン (Cellular Automaton)

人工生命の一つのモデルであるセル・オートマトン (CA) は、格子状のセルと単純な規則による離散的計算モデルである。無限に広がる有限次元の格子状のセルで構成され、各セルは有限個の内部状態を持ち、時間と共に内部状態が更新される。非常に単純化されたモデルであるが、最近、コンピュータの性能向上により、様々な複雑系の現象に用いられている。具体的には、生物の流れ模様、地球規模の気象変化、免疫や脳の機能などの現象解析があり、交通流問題もその中一つである。交通流において、実際道路での車群の流れは非常に複雑であり、これらの様子を微分方程式では詳細に表現できない。そこで、周辺セルに車両が有るか無いかによって車を移動させるルールを設定すると、CA を用いた交通流モデルが車両の挙動を再現できる [36]。

3.2.1 基本交通流モデルの Rule-184

セル C が時刻 t ときの値を、従属変数 U を用いて、 U_c^t と書くことにする。更に、 C セルの $t+1$ 時刻の値が、自身と前後のセルの t 時刻の値によって決定される場合、

$$U_c^{t+1} = f(U_{c-1}^t, U_c^t, U_{c+1}^t) \quad (3.1)$$

のように関数形式で表現できる。ここで、セルの値は 0、もしくは 1 である。このような CA を Elementary Cellular Automaton (ECA) と呼ぶ。そのパターンは 2^3 個であり、それぞれの値に対して、表 3.1 のように U_c^{t+1} を決定することで、一つの ECA が定まる。 U_c^{t+1} の並びをバイナリ値として ECA を区別するルール番号とする。例えば、 $[10111000]_2 = 128+32+16+8=184$ より、ルール 184 となる。

Table 3.1 Rule 184

$(U_{c-1}^t, U_c^t, U_{c+1}^t)$	111	110	101	100	011	010	001	000
U_c^{t+1}	1	0	1	1	1	0	0	0
Rule number	128	64	32	16	8	4	2	1

一方、図 3.1 のように、ある道路を等間隔に区切り、その一つ一つをセルとし、一つのセ

ルには 1 台の車しか入らないとする。このとき、車両が存在するセルを状態 1、空セルを状態 0 として、時間 1 ステップごとに前方のセルが空いていれば進み、車両が存在すれば留まるようにする。これを式で表現すると、

$$U_c^{t+1} = U_c^t + \min(U_{c-1}^t, 1 - U_c^t) - \min(U_c^t, 1 - U_{c+1}^t) \quad (3.2)$$

ようになり、これが rule-184 である [37]。このモデルは単純化すぎて、現実的な状況を反映できない。その後、ルール 184 を基に拡張した様々な CA 交通流モデル [47] - [52] が提案されている。

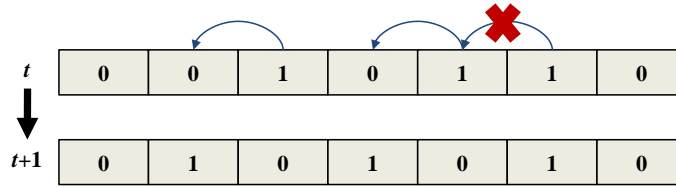


Fig.3.1 Simple cellular automaton traffic model (Rule-184)

3.2.2 従来の CA 交通流モデル

A. ASEP モデル

ASEP モデルは、非対称単純排他過程（Asymmetric Simple Exclusion Process）と呼ばれる非平衡統計力学モデルである [38]。このモデルは、Rule-184 の確率バージョンとも言われ、図 3.2 のように、車両は確率 p_{asep} で進み、 $1 - p_{asep}$ で留まる。確率 p_{asep} は、交通流量と密度の間に次式により関係付けられる。

$$Tv = \frac{1 - \sqrt{1 - 4p_{asep}Td(1 - Td)}}{2} \quad (3.3)$$

Tv : 交通流量

Td : 密度

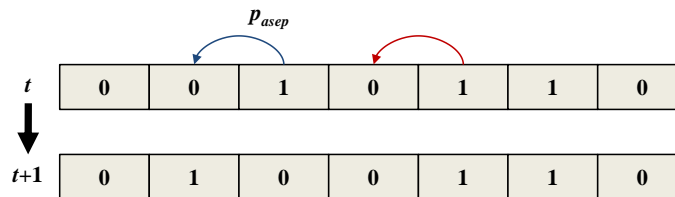


Fig.3.2 Asymmetric Simple Exclusion Process (ASEP) model

B. Fukui Ishibashi (FI) モデル

FI モデル [39] は、1 ステップで、前方が空いていれば複数のセル進むことが出来るモデルである。最高速度 2 セルとすると、

$$U_c^{t+1} = U_c^t + \min(x_{c-1}^t + y_{c-2}^t, 1 - U_c^t) - \min(x_c^t + y_{c-1}^t, 1 - U_{c+1}^t) \quad (3.4)$$

となる。ここで、 x は移動速度が 1 セル、 y は移動速度が 2 セルの車両で、

$$x_c^t = \min(U_c^t, 1 - U_{c+1}^t) \quad (3.5)$$

$$y_c^t = \min(U_c^t, 1 - U_{c+1}^t, 1 - U_{c+2}^t) \quad (3.6)$$

と表すことができる。このモデルの一例を図 3.3 に示す。

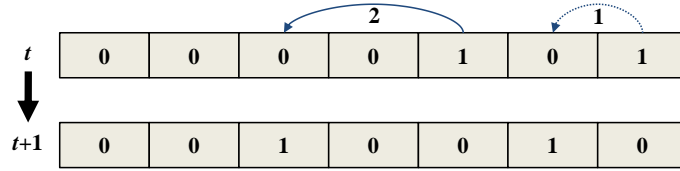


Fig.3.3 Fukui Ishibashi (FI) model

C. Slow Start (SIS) モデル

SIS モデル [40] は、車両の慣性の効果を入れたものである。車両が止まるときは、ある程度早く止まることができるが、一度止まった車両は次に早く移動できないことを式 (3.7) のようなルールに組み込んでいる。車両移動の例を図 3.4 に示す。

$$U_c^{t+1} = U_c^t + \min[U_{c-1}^t - (U_{c-1}^{t-1} - \min(U_{c-1}^{t-1}, 1 - U_c^{t-1}), 1 - U_c^t)] - \min[U_c^t - (U_c^{t-1} - \min(U_c^{t-1}, 1 - U_{c+1}^{t-1}), 1 - U_{c+1}^t)] \quad (3.7)$$

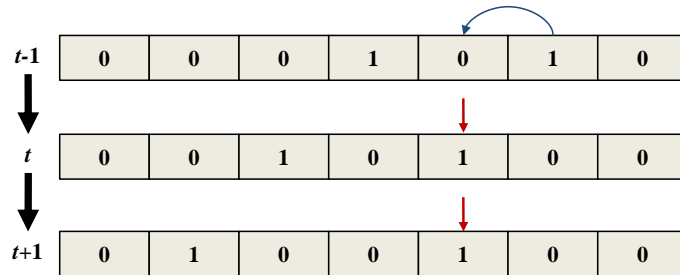


Fig.3.4 Slow Start (SIS) model

D. Quick Start (QS) モデル

QS モデル [41] は、見通しの概念を入れたルールで、2 セル先まで見て移動する。次のセル $j+1$ に車両がある場合でも、セル $j+2$ に空いていれば、前に移動する。

$$U_c^{t+1} = U_c^t + \min(U_{c-1}^t, 1 - U_c^t + \min(U_c^y, 1 - U_{c+1}^t)) - \min(U_c^t, 1 - U_{c+1}^t + \min(U_{c+1}^y, 1 - U_{c+2}^t)) \quad (3.8)$$

その一例を図 3.5 に示す。

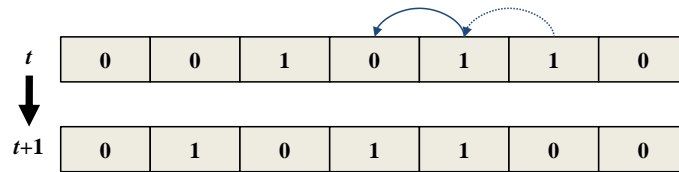


Fig.3.5 Quick Start (QS) model

E. Nagel Schrechenberg (NS) モデル

NS モデル [42] は、K. Nagel と M. Schrechenberg によって提案された高速道路の交通流モデルである。このモデルは、確率を導入し、車両の速度を減速させるランダムブレーキ概念を取り入れたモデルである。このモデルは、乱数を組み込んだ確率論的なモデルのため数式での表現が困難で、更新ルールとして表現する。

Step 1 : 加速

車両の速度 v_c が最高速度 v_{\max} より小さくて、更に、前方 $v_c + 1$ まで空いていれば、速度を 1 単位上げる。

Step 2 : 減速

セル c_a にある車両は、その前 $c + cv$ セルまで空いているとき、 $cn < v_c$ なら、セル c にある車両の速度を cn にする。

Step 3 : ランダムブレーキ

車両の速度が 0 より大きい場合、確率 p_b で速度を 1 単位下げる。

Step 4 : 移動

Step1～3 により更新した速度に基づき、車両を移動する。

ここで速度は、1 ステップに移動するセル数として表現している。このモデルの一例を、図 3.6 に示す。0 以外の数値は車両有りの状態で、各車両の速度を意味する。右から最初の車両の速度は 3 であるが、前方に車両があるため、速度は 1 となる。右から二番目の車両の速度は 2 であるが、前方 3 つのセルが空いているため、加速して 3 となる。右から三番目の車両は、速度 2 からランダムブレーキにより減速して 1 となる。

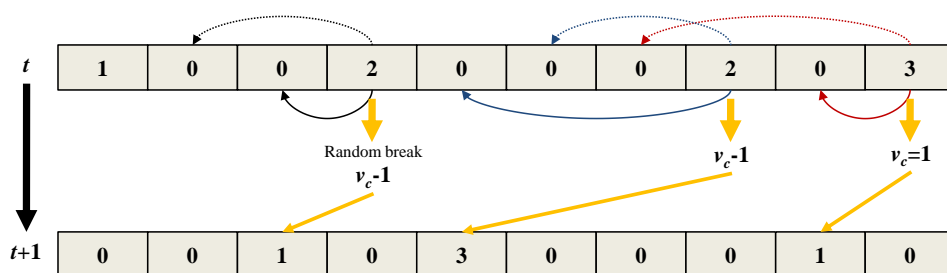


Fig.3.6 Nagel Schrechenberg (NS) model

3.3 CA 交差点交通流モデルの構築

交通流入・流出量を推定するため、都心部交差点における交通流の特徴を考慮し、交通密度と車の位置によって異なる確率で加減速、車線変更、及び進行方向によって右折専用車線へ移動と交差点を通過する CA 交差点交通流モデルを構築する。

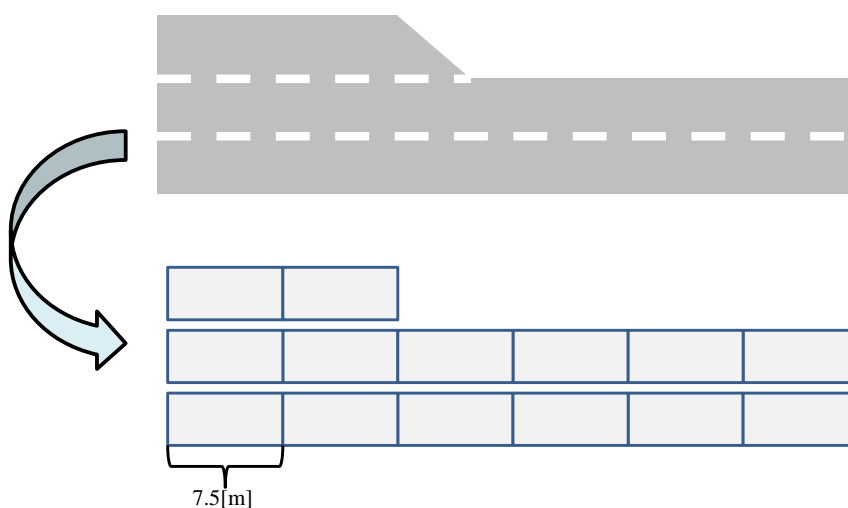


Fig.3.7 Example for cell setting of road

まず、セルによる道路の設定として、車両の平均長 5 [m] と前後の車両間距離を考慮し、車両の占有長 7.5 [m] を 1 [cell] とする。車線（レーン）数は、実道路の車線数と同じく設定し、右折専用車線も考慮する。一例として、ある 3 車線（1 つの右折専用車線）を持つ道路は、図 3.7 のように、セルで表現することができる。

3.3.1 流入・流出部の設定

A. 流入部

流入部のセルが空いている時、ルール 1 により道路への流入率により流入車両を設定し、ルール 2 により車両の進行方向を決定する。ここで進行方向とは、流入部から入った車両の流出部の交差点を通過して、移動する道路により分類する。具体的には、次のようになる。

Rule1：車両生成

$InR < rand()$ であれば、車両を生成する。

Rule2：進行方向の決定

$Dir_{d-1} < rand() < Dir_d$ であれば、車両の進行方向を道路 d への移動とする。

ここで InR は流入確率で、測定交通データと式 (3.9) により、また Dir_d は進行方向比率で、測定された交通データと式 (3.10) によって計算する。一方、 $rand()$ は 0～1 のランダム数値、 d は、流出部の道路番号（時計回り）である。ランダム数値の生成は、Mersenne Twister アルゴリズム [59] を用いている。

$$InR = \frac{\sum_{m=1}^{m=k-1} I_m}{\sum_{m=1}^{m=k-1} Ct_m \cdot Ln} \quad (3.9)$$

$$Dir_d = \frac{\sum_{m=1}^{m=k-1} Od_m}{\sum_{m=1}^{m=k-1} O_m} \quad (3.10)$$

k : 現サイクル番号

m : サイクル番号

Ct : サイクル長

Ln : 車線数

d :車両の進行方向

Od :車両の進行方向が d の流出量

一例として、ある十字路交差点道路における流入部を図 3.8 に示す。ここで番号は進行方向で、1 番は左折、2 番は直進、3 番が右折である。流入車両は、まずルール 1 により生成され、次にルール 2 により進行方向が決定される。この例では、進行方向が 2 で直進車両となる。

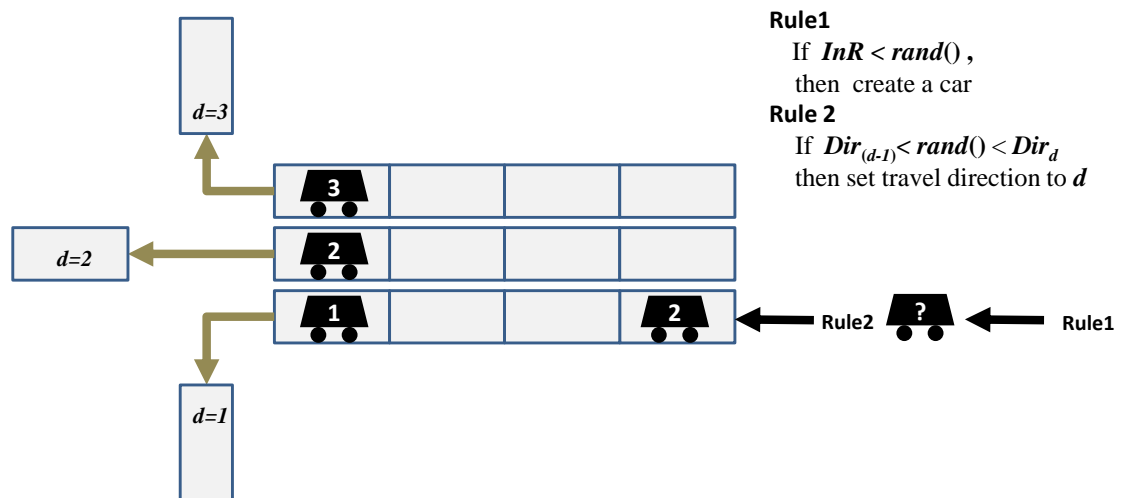


Fig.3.8 Example for inflow

B. 流出部

流出部において、流出セルにある車両は、自分の進行方向である道路に車両がない場合、信号現示と車両の進行方向に基づき移動する。一例として、ある 5 差路交差点道路における流出部を図 3.9 に示す。この時、対象道路における青信号現示は、直進信号（進行方向が道路 2 と道路 3 の車両に通過権を与える信号現示）である。そこで、車両 3 は道路 3 へ移動する。車両 2 は、道路 2 に車両が残っているため、移動できない。車両 1 と 4 は、赤信号により通過権がないため、移動できない。一方、流出部が交差点ではない場合は、流出確率 0.85 がランダム数値より小さい場合、車両を流出させ、セルを空にする。

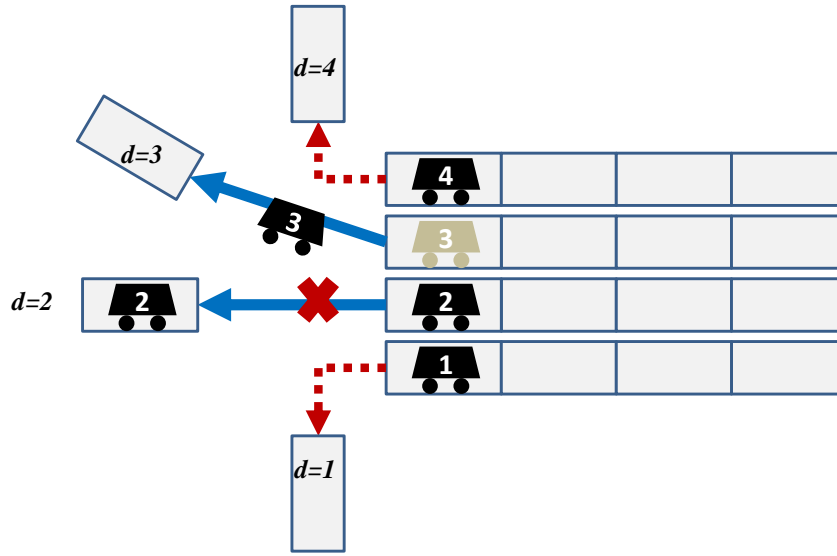


Fig.3.9 Example for outflow

3.3.2 移動ルール

ここでは、都心部での平均速度 30~40 [km/h] を考慮し、最高速度を $v_{\max} = 2$ [cell/step] とする。具体的な移動ルールは、次のようになる。

Step 1 : セルチェック

セル c_i にある車両は、 $(c_i + 1)$ セルが空いている時は Step2 の処理を、 $(c_i + 1)$ セルに車両がある時は Step4 の処理をする。

Step 2 : 移動

1 [cell] 先に移動し、 $(c_i + 2)$ セルが空いている時は Step3 の処理を、 $(c_i + 2)$ セルに車両がある時は処理を終了する。

Step 3 : 加速

確率 P_{acc} がランダム数値より小さければ、1 [cell] 先に移動し、処理を終了する。

Step 4 : 車線チェック

多車線道路の場合、Step5 の車線変更を行い、1 車線の場合は処理を終了する。

Step 5 : 車線変更

横のセル c_j と前後のセル $(c_j + 1)$ 、 $(c_j - 1)$ 、 $(c_j - 2)$ が空いていると、セル $(c_j + 1)$ に移動する。

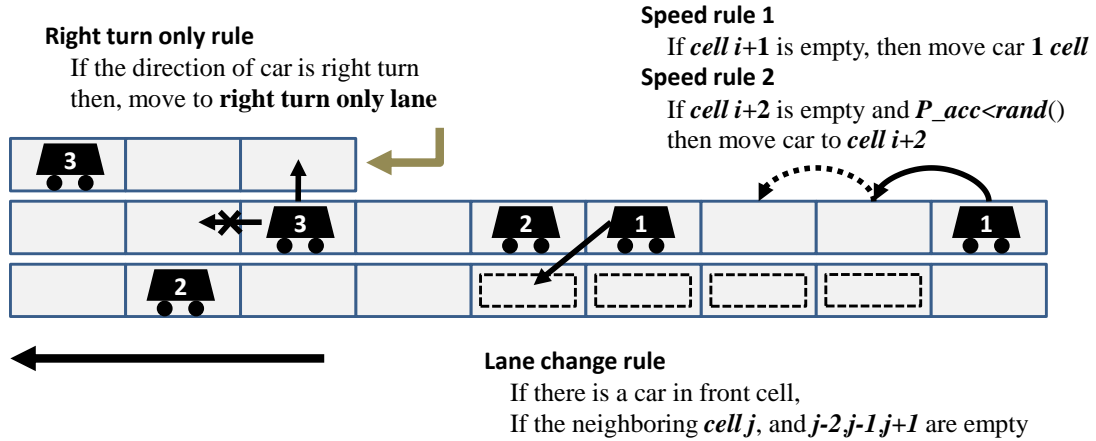


Fig.3.10 Example for movement

ここで確率 P_{acc} は、次式により与えられる。

$$P_{acc} = P_0 - Td \cdot rand() \cdot 0.1 \quad (3.11)$$

P_0 : 設定値

Td : 交通密度

一般道路では $P_0 = 0.8$ と設定しているが、交差点付近では通行人や右折専用車線への車両の移動などによる影響で平均速度が落ちるので、交差点から 10 [cell] 内で移動する時には $P_0 = 0.5$ と設定している。更に右折専用車両は、必ず右折専用車線へ移動させる。一例を図 3.10 に示す。

3.4 交通流入・流出量の事前確率分布の算出法

一般的に、交通流入量は、サイクル長、交通流出量と予測する時点の道路交通状況、及び各信号現示長より異なる。これらの関係を説明するため、図 3.11 に、ある十字路交差点を例として、 k [cycle] 時の交通流量と渋滞量及び、信号現示長との関係を示す。この図から分かるように、交通流入量はサイクル長に比例して増減し、交通流出量は青信号現示時間に比例して増減する特徴がある。一方、交通流出量は、青信号現示長を一定にした場合、残存渋滞車両 (S_{k-1}) が多いほど流出量が多くなる。更に、残存渋滞車両 (S_{k-1}) が解消される T_c までは、単位時間の流量は高いが、その後は交通流入量とほぼ同じになる。これらの特徴を考慮

して、まず CA 交差点交通量モデルを用いて、現道路交通状況下で、ある交通信号時の交通流入・流出量を推定し、次に推定交通量と過去の測定交通量データに基づき事前確率分布を計算する。

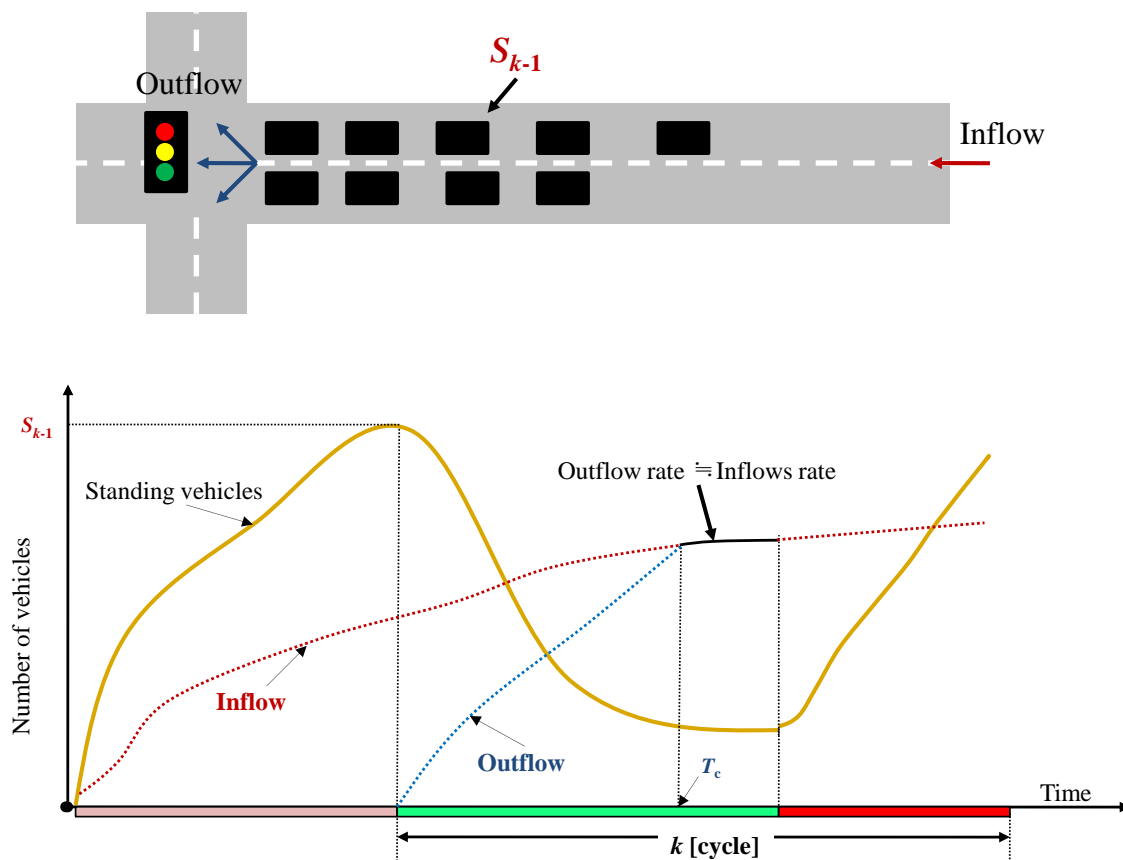


Fig.3.11 Relation of traffic flow and traffic signal

ここで、 k [cycle] 時の異なる交通信号における交通流入・流出量の事前確率分布の更新手順を示す。

Step 1 : 初期設定

CA 交差点交通流モデルの設定を行う。まず、対象道路をセルとして表現する。次に、過去の測定交通量データに基づき、式 (3.9) と (3.10) を用いて流入部における流入率流入確率 InR との進行方向の比率 Dir を設定する。更に、 $k-1$ [cycle] 時の対象道路での残存車両台数に基づき、CA モデルの中の道路（セルで表現）上で車両を生成する。

Step 2 : 交通量の推定

CA 交差点交通流モデルを用いて k [cycle] のある交通信号時の交通流入量 \hat{I}_k と流出量 \hat{O}_k を推定する。

Step 3 : 測定交通量の換算

k [cycle] 以前の測定交通流入・流出量と k [cycle] の交通信号に基づき、式 (3.12)、(3.13) と (3.14) により、 k [cycle] のある交通信号における交通流入量 \hat{I}_m と流出量 \hat{O}_m に換算する。

$$\hat{I}_m = I_m \cdot \frac{Ct_k}{Ct_m} \quad (3.12)$$

$$\hat{O}_m = \begin{cases} O_m \cdot \frac{phase_k^g}{phase_m^g} & (phase_k^g \leq T_c) \\ O_m \cdot \frac{T_c}{phase_m^g} + I_m \cdot (phase_k^g - T_c) & (phase_k^g > T_c) \end{cases} \quad (3.13)$$

$$T_c = \frac{S_{k-1}}{(\frac{O_m}{phase_m^g} - \frac{I_m}{Ct_m})} \quad (3.14)$$

m : サイクル番号 ($m=1,2,\dots,k-1$)

Ct : サイクル長

$phase^g$: 対象道路の車両を流出させる信号現示の時間

I : 流入量

O : 流出量

S : 渋滞量

Step 4 : 確率分布の計算

換算した交通流入量 \hat{I}_m と流出量 \hat{O}_m を用いて、 $k-1$ [cycle] の交通流入量の確率分布 $P(\hat{I}_{k-1}^i)$ と流出量の確率分布 $P(\hat{O}_{k-1}^i)$ を計算する。ここで、 $m=1,2,\dots,k-1$ である。

Step 5 : 事前確率分布の計算

k [cycle] 時の推定流入量 \hat{I}_k と流出量 \hat{O}_k 、及び $k-1$ [cycle] の交通量の確率分布を用い

て、式 (3.15) から (3.18) により交通流入・流出量の事前確率分布を計算する。

$$\hat{P}(I_k^e) = P(\hat{I}_{k-1}^e) - \frac{\gamma}{E-1} \quad (\hat{I}_{k-1}^e \neq \hat{I}_k) \quad (3.15)$$

$$\hat{P}(I_k^e) = P(\hat{I}_{k-1}^e) + \frac{\gamma \cdot n}{E-1} \quad (\hat{I}_{k-1}^e = \hat{I}_k) \quad (3.16)$$

$$\hat{P}(O_k^e) = P(\hat{O}_{k-1}^e) - \frac{\gamma}{E-1} \quad (\hat{O}_{k-1}^e \neq \hat{O}_k) \quad (3.17)$$

$$\hat{P}(O_k^e) = P(\hat{O}_{k-1}^e) + \frac{\gamma \cdot n}{E-1} \quad (\hat{O}_{k-1}^e = \hat{O}_k) \quad (3.18)$$

$e \in (0, 1, 2, \dots, E)$

$e : k-1$ [cycle] の流入量と流出量において発生した事象の番号

$E : 発生車両数の事象数$

$\gamma : 経験値 (5\%)$

3.5 CA 交差点交通流モデルを用いたマイクロシミュレータの構築

この節では、CA 交差点交通流モデルを用いたマイクロシミュレータを構築する [57、58]。更に、このマイクロシミュレータを用いて提案する交通信号制御法の制御性能を検討する。このマイクロシミュレータの処理過程のフローを図 3.12 に、マイクロシミュレータの初期設定、及び処理画面の一例を図 3.13 に示す。

Step 1 : 初期設定

道路ネットワークにおける交差点の数、交差点における道路の長さ、車線数を設定し、CA 交通流モデルにおける流入確率、進行方向比率を設定する。また、各交通信号機の信号制御パラメータを設定する。ここで、信号制御パラメータについて指定なしの場合は、Webster の経験公式を用いて計算する。

Step 2 : パラメータ初期化

ステップ数 St 、サイクルステップ数 Ct 、サイクル数 k を初期化する。ここで、ステップ数はシミュレーションの時間を、またサイクルステップは各交差点のサイクル長をカウントする数である。但し、サイクルステップとサイクル数は、信号機毎に異なる。

Step 3 : ステップチェック

ステップ数がシミュレーション時間 (Stime) より小さい場合は、次の処理に続き、そう

でない場合は、Step15 の処理をする。

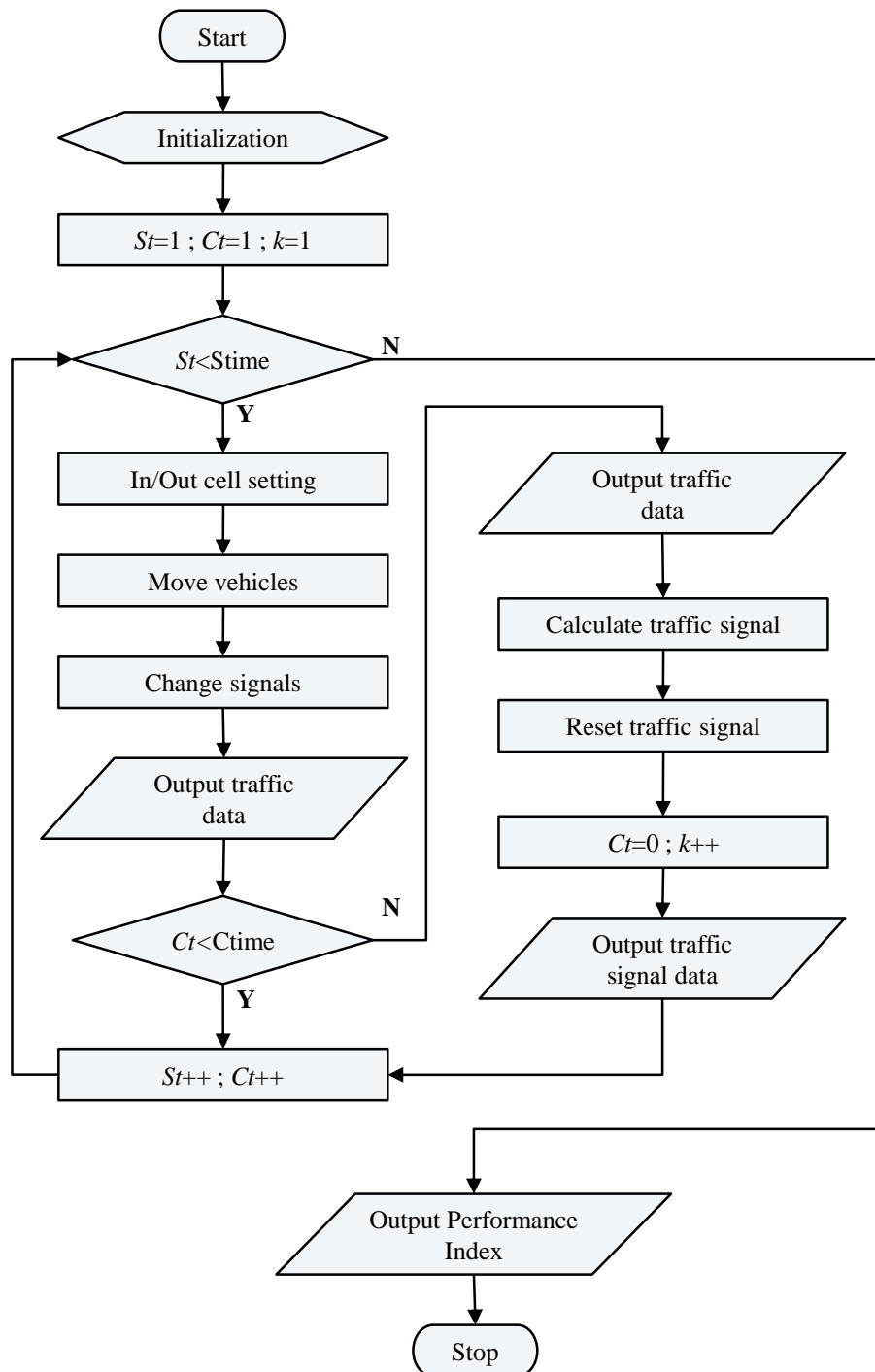


Fig.3.12 Flowchart of micro simulator

Step 4 : 流入・流出部処理

CA 交差点交通流モデルの流入部と流出部の処理をする。ここで流入確率、進行方向比率などパラメータは、初期設定で行う。

Step 5 : 車両移動

CA 交差点交通流モデルの移動ルールにより、道路上の車両を加減速、車線変更をする。

Step 6 : 信号現示の更新

サイクルステップ Ct と信号現示長により、信号現示を変更する。例えば、ある信号現示（青信号現示）が終了すると、次の信号現示（黄信号現示）に変更する。

Step 7 : 記録 1

各車両の総移動距離、移動した車両数、停止している車両数などを、道路とステップ数別に記録する。

Step 8 : サイクルチェック

サイクルステップが設定したサイクル長（ $Ctime$ ）より小さい場合は、次の処理に続き、そうでない場合は、Step10 の処理をする。

Step 9 : カウント

ステップ数とサイクルステップを+1 し、Step3 に戻る。

Step 10 : 記録 2

各道路における交通流入量、進行方向別の流出量、渋滞量、サイクル数、交差点番号などを記録する。

Step 11 : 交通信号の計算

次サイクルの交通信号の制御パラメータを計算する。計算アルゴリズムが設定されてなければ、前サイクルの交通信号パラメータを使用する。

Step 12 : 交通信号設定

対象信号機の交通信号の制御パラメータを更新する。

Step 13 : パラメータのリセット

サイクルステップ $Ct=0$ とし、サイクル長を+1 する。

Step 14 : 記録 3

更新された交通信号の制御パラメータに関連する情報（信号番号、サイクル番号、サイ

クル長、各信号現示長)を記録する。

Step 15 : 記録 4

制御性能の評価指標(渋滞長、平均速度、遅れ時間など)を計算して記録し、次の処理をする。ここで、各指標は、Step 7、Step 10、Step 14 で記録したデータを用いて計算する。具体的な計算は省略する。

Step 16 : 終了

シミュレーションを終了する。

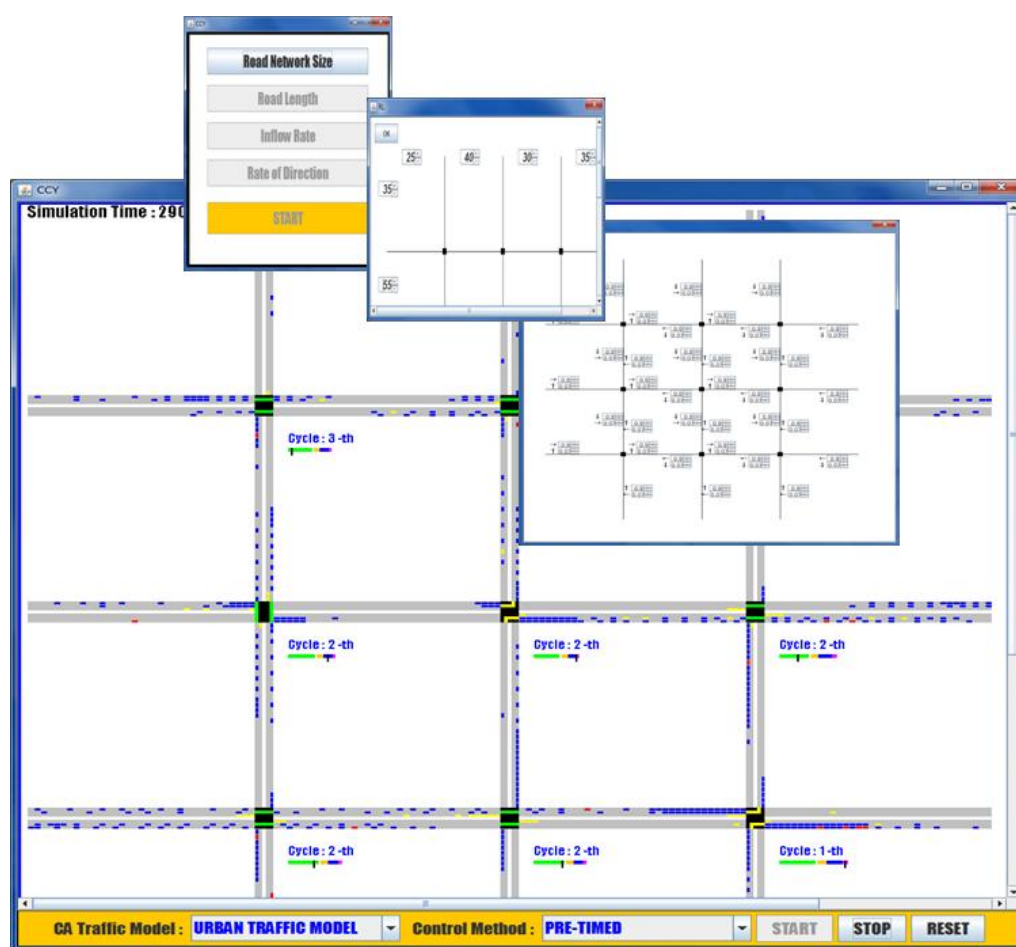


Fig.3.13 Monitor of simulator

3.6 CA 交差点交通量モデルの評価

マイクロシミュレータを用いて CA 交差点交通流モデルの妥当性について検討する。まず、CA 交差点交通流モデルの車両挙動について評価し、次に、交通流入・流出量の推定について検討する。

3.6.1 車両挙動

CA 交差点交通流モデルの車両挙動を評価するため、マイクロシミュレータを用いて 2 車線、長さ 50 [cell] の道路を仮定し、CA 交差点交通流モデルを用いて車両を移動させる。評価指標としては、交通密度の変化に伴い、ある点を通過した交通量を表す交通流の基本図と平均速度と交通密度の関係、及び平均速度と交通量の関係図とする。この基本図には、主に車両密度が低密度領域と高密度領域 2 つの領域が存在する。低密度領域では、密度の増加に従って流量が増加し、これは交通流がほぼ一定の速度で走行していることを示している。ところが交通流量がピークに達すると、それ以上に密度が大きくなっても交通流量は増加せず、逆に右下がりに減少している。一般道路においては、車両の平均速度が 20 [km/h] 以下になった状態を渋滞、高速道路においては 40 [km/h] 以下を渋滞としている。

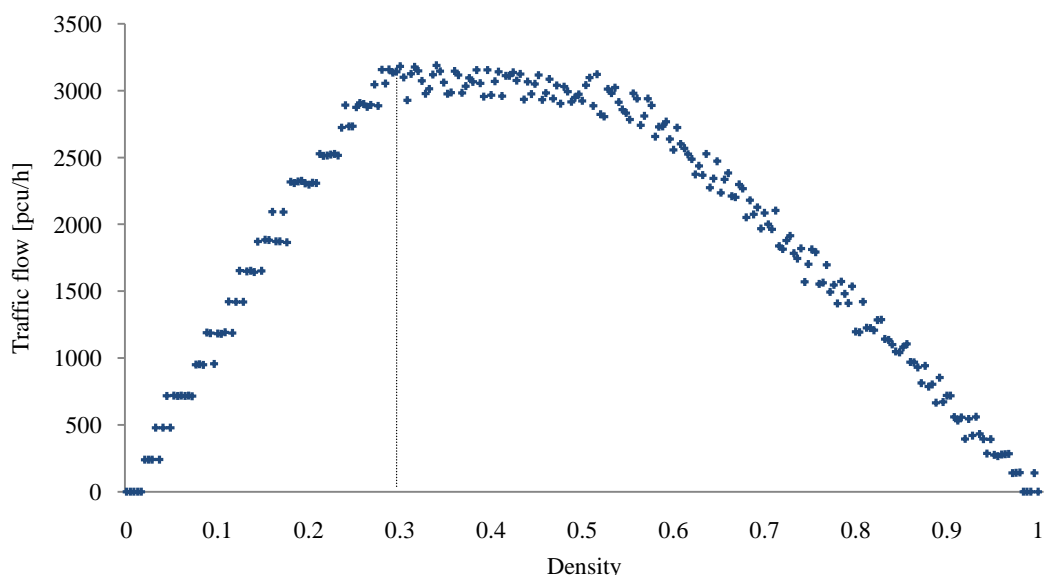


Fig.3.14 Traffic flow com with different density

CA 交差点交通量モデル用いた交通流シミュレーションの結果として、図 3.14 には、基本図を、図 3.15 には平均速度と密度関係図を、図 3.16 には平均速度と交通量の関係図を示す。図 3.14 から、交通密度が 0.3 以下までは密度の増加と共に交通量は増加しているが、0.3 を超えると密度の増加と共に交通量は減少し、また、交通密度が 0.6 以上になると交通量は著しく減少し、渋滞が発生していることが分かる。図 3.15 からは、交通密度が大きくなると平均速度が減少していることが分かる。更に、最高速度は 45 [km/h] を超えてないことが確認で

きる。これは、提案する CA 交差点交通流モデルが都心部道路における交通流の平均速度 30～40 [km/h] を想定しているためである。図 3.16 から、平均速度が約 20 [km/h] 以下になると、交通量が著しく減少し、渋滞が発生していることが分かる。

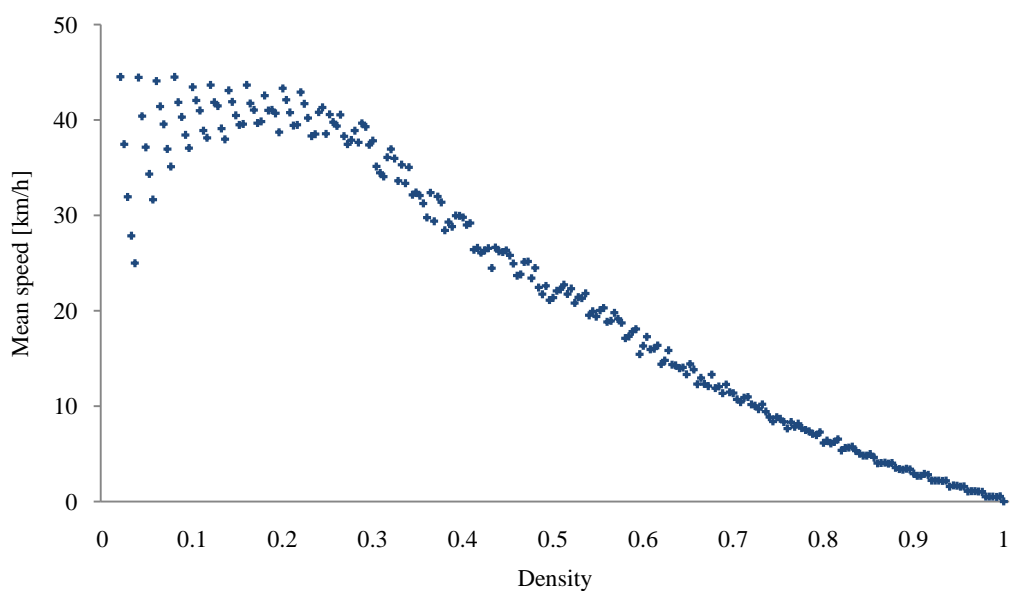


Fig.3.15 Speed com with different density

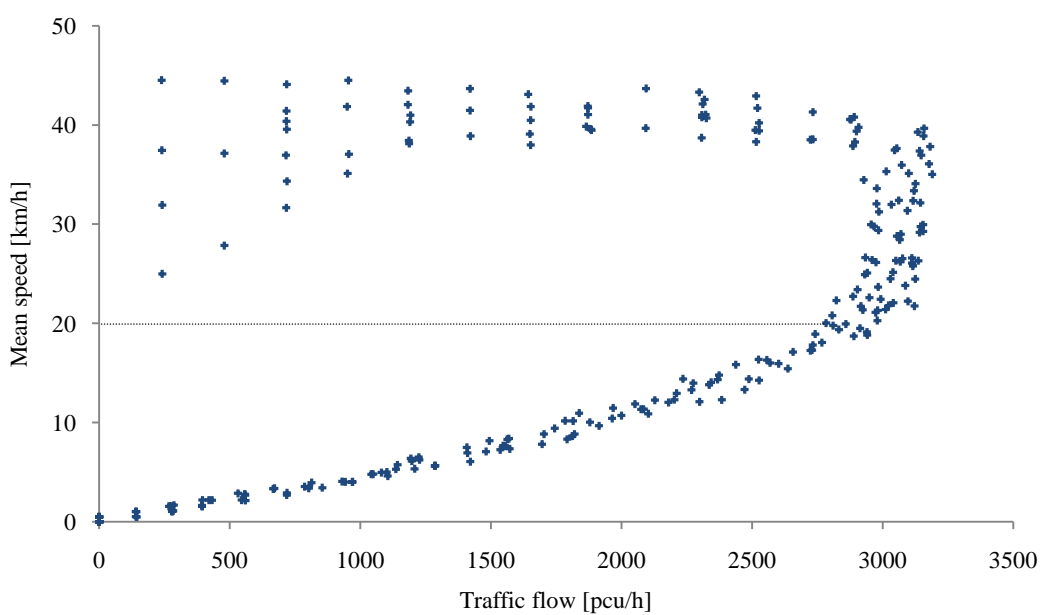


Fig.3.16 Speed com with different traffic flow

3.6.2 交通流入・流出量推定値の評価

CA 交差点交通量モデルを用いた交通流入・流出量の推定について検討するため、実交差点で測定された交通データの統計量に基づきマイクロシミュレータを設定し、交通量を推定した。この推定値を実データと比較検討する。



Fig.3.17 Map of Tutsimachi intersection

対象とした交差点エリアは、北九州市八幡西区にある筒井町交差点で、交通量、及び信号パラメータの計測日時は、2008 年 1 月 17 日の午後 5 時から 7 時までで、この交差点は定周期信号制御方式である。図 3.17 に、筒井町交差点と対象道路の地図を示す。マイクロシミュレータの設定において、交通信号の制御パラメータは実交差点での信号機と同じく設定し、実道路により車線数を 3、道路長を 45 [cell]、右折専用レーンの長さを 10 [cell] とする。流入確率と進行方向の比率は、実データの統計量に基づき設定し、推定は、毎回 1 時間で合計 10 回行い、その推定交通量と実データを比較した。

Table 3.2 Comparison of inflows and outflows

	Real traffic data	Micro-Simulator		
		Average	Standard deviation	Mean error (per cycle)
Inflows [pcu/h]	2,325	2,362.7	26.1	1.57
Outflows [pcu/h]	2,229	2,212.9	27.7	0.57

表 3.2 に、交通流入・流出量の比較として、実データとマイクロシミュレータにより得られた 10 回の平均値、標準偏差、及びサイクル毎の平均誤差を示す。表 3.3 には、進行方向別の交通流出量の比較として、実交通データおよび推定交通量の毎サイクルの平均値と標準偏

差を示し、一例として、各サイクル時の進行方向別の流出交通量の変化を図 3.18、3.19、3.20 に示す。

Table 3.3 Comparison of travel direction

	Real traffic data		Micro-Simulator	
	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
Straight	66.9	6.3	67.5	4.6
Left turn	18.0	2.7	18.3	4.0
Right turn	7.8	1.6	7.6	1.1

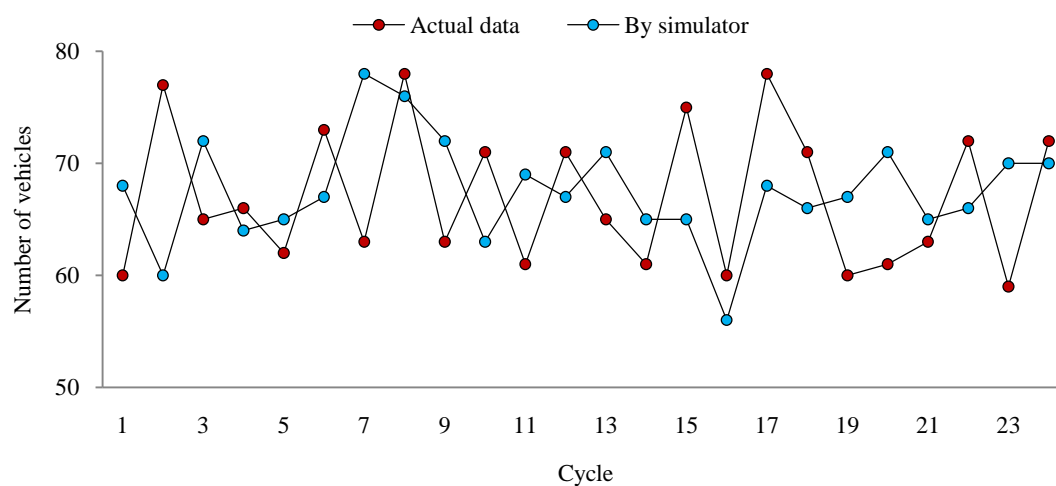


Fig.3.18 Comparison of outflows (Straight)

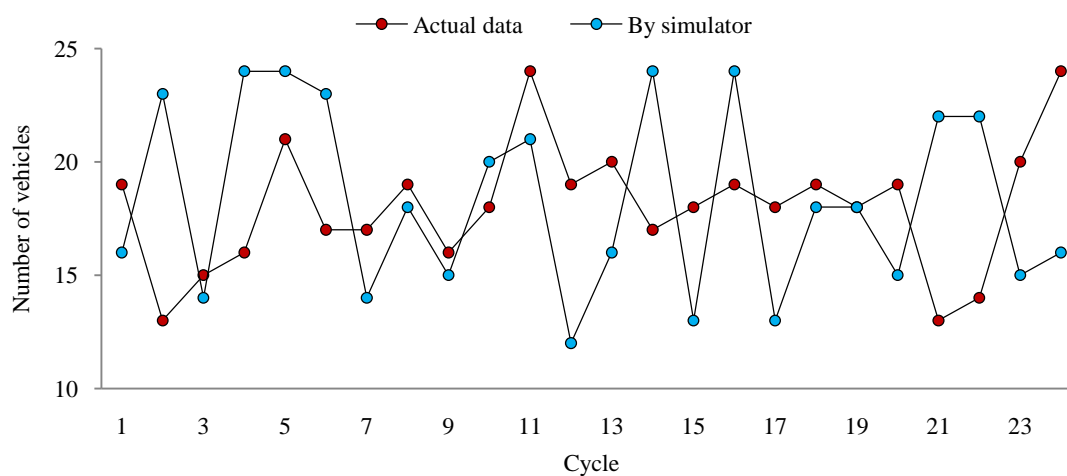


Fig.3.19 Comparison of outflows (Left turn)

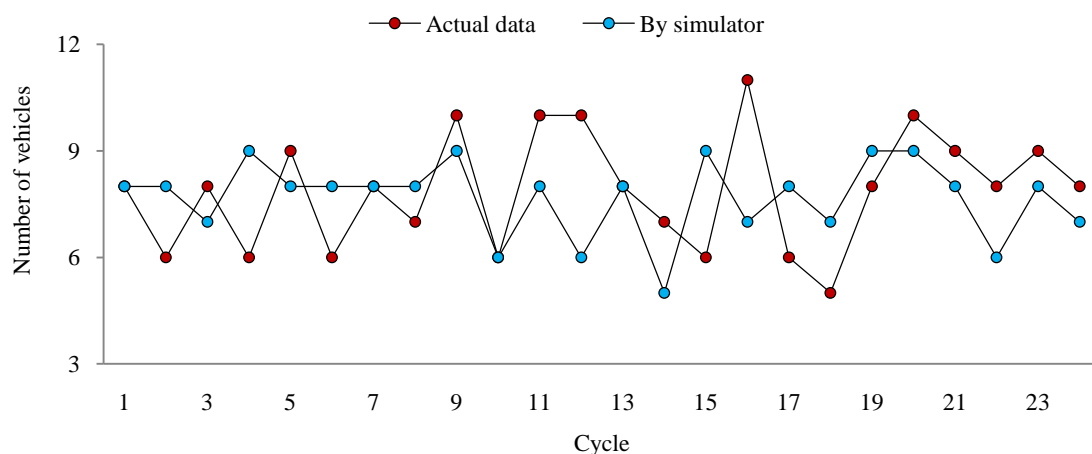


Fig.3.20 Comparison of outflows (Right turn)

図 3.18、3.19、3.20 から、推定交通量は実データと同様に、不規則に変動していることが確認できる。更に、表 3.2 と 3.3 から推定値と実データの誤差は、交通流入量は 1.57 [台]、流出量は 0.57 [台] で、流出交通量において、直進車両は 0.8 [台]、左折車両は 0.3 [台]、右折車両は [0.2] となり、CA 交差点交通流モデルによる交通流入・流出量の推定は、有効であることを示している。

3.7 まとめ

本章では、都心部交差点交通流の特徴を考慮した CA 交差点交通流モデルの構築法と、CA 交差点交通流モデルを用いた推定交通流入・流出量に基づく事前確率分布の更新法を提案した。そして、CA 交差点交通流モデルを用いてマイクロシミュレータを構築し、実交通データと比較検討により CA 交差点交通流モデルの妥当性を示した。

第 4 章

十字路交差点における実時間交通信号制御

4.1 はじめに

本章では、最も一般的な十字路交差点を対象とし、交通渋滞確率分布最適化ための実時間交通信号制御法を述べる。その構造を図 4.1 に示す。

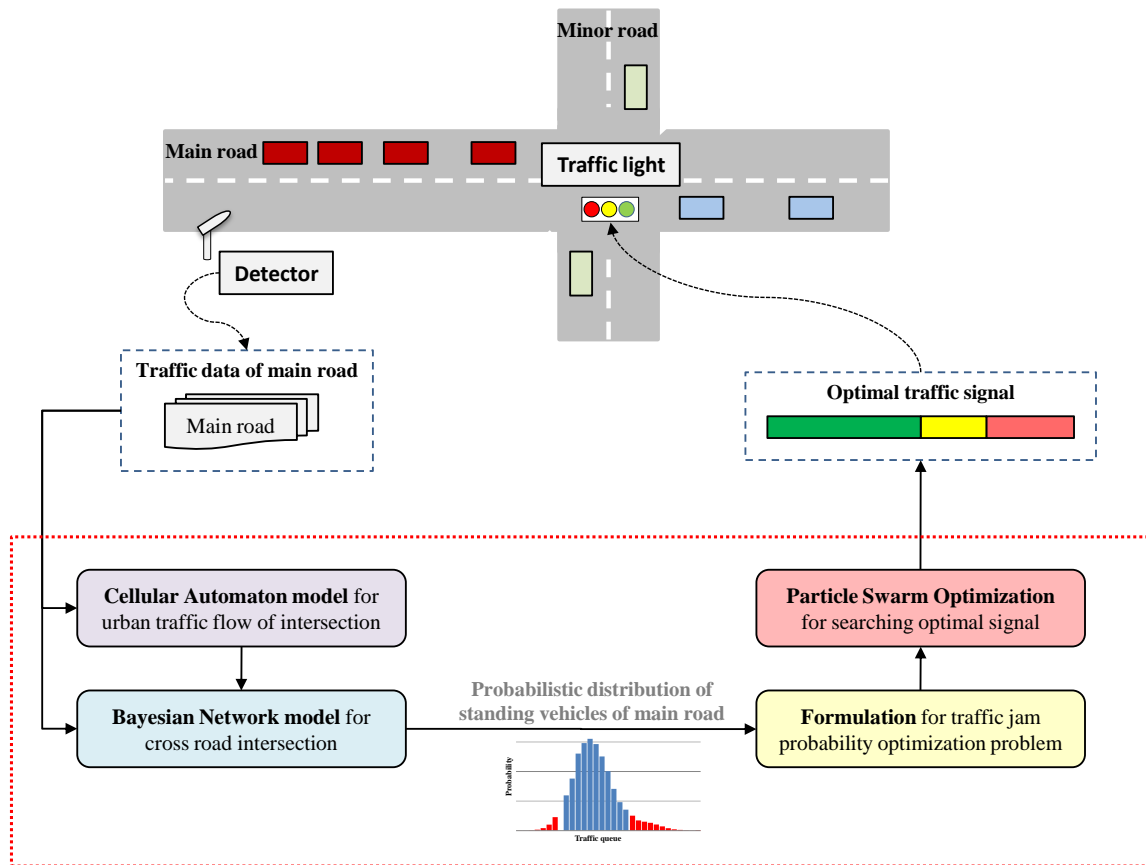


Fig.4.1 Structure of proposed real-time traffic signal control method for cross road

十字路交差点交通量 Bayesian Network (BN) 確率モデルを用いて交通量が多い主道路での渋滞量確率分布を予測し、その渋滞量確率分布の中で、過多停車量以上と過小停車量以下となる確率、及び主道路における信号現示長とサイクル長との関係により、交通渋滞量確率分布最適化問題を定式化する。この時、交通流入・流出量の事前確率分布は、Cellular Automaton (CA) 交差点交通流モデルによる推定交通量と測定交通データに基づき、第 3 章で提案した算出法により更新する。サイクル毎に交通信号を実時間制御するために、構造が簡単で収束速度が速い Particles Swarm Optimization (PSO) を用いる。これにより、当該サイクルの許容処理時間内で十字路交差点における交通渋滞量確率分布最適化問題の解を求め、最適交通信号現示長を決定する。最後に、実交通データとマイクロシミュレータを用いたシミュレーシ

ョンにより、提案法の有効性を示す。

4.2 十字路交差点における交通渋滞量確率分布最適化問題の定式化

交通信号制御は、信号による影響で停止することなく走行した場合の旅行時間と実際の旅行時間との差である遅れ時間が小さくなるように、各信号現示の時間を決定することがポイントである。遅れ時間は、各信号現示及び交通量と緊密な関係があり、遅れ時間を減少させるためには、渋滞量と変動する交通量の情報を用いて渋滞確率が小さくなる信号現示長を決定する確率的最適制御を行う必要がある。そこで、十字路交差点交通量 BN 確率モデルを用いて予測した渋滞量確率分布と交通信号との関係に基づき、十字路交差点における交通渋滞量確率分布最適化問題を定式化する。

4.2.1 十字路交差点交通量 BN 確率モデルによる渋滞量確率分布の算出

ここでは、図 4.2 に示すような十字路交差点を例として、十字路交差点交通量 BN 確率モデルを説明する。

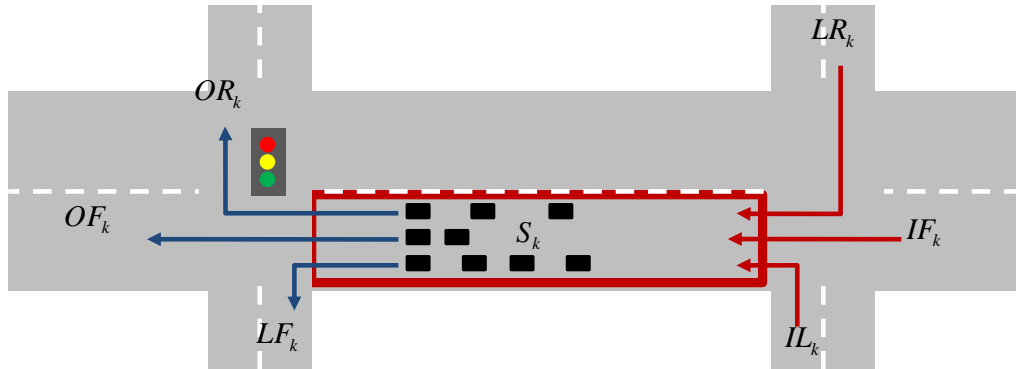


Fig.4.2 Crossroad intersection

この十字路交差点の主道路（東西方向）において、 k [cycle] 時の渋滞量は、交通流入・流出量を用いて式 (4.1) で表すことができる。

$$S_k = S_{k-1} + IF_k + IL_k + IR_k - OF_k - OL_k - OR_k \quad (4.1)$$

S_k : k サイクル時の渋滞量

S_{k-1} : k サイクル時の渋滞量

IF_k : k サイクル時の直進流入量

IL_k : k サイクル時の左折流入量

IR_k : k サイクル時の右折流入量

OF_k : k サイクル時の直進流出量

OL_k : k サイクル時の左折流出量

OR_k : k サイクル時の右折流出量

各々の交通量は、その時点の道路状況により不規則に変動しているので、これらの交通量を確率変数と見なすと、図 4.3 のような BN モデルで表すことができる。

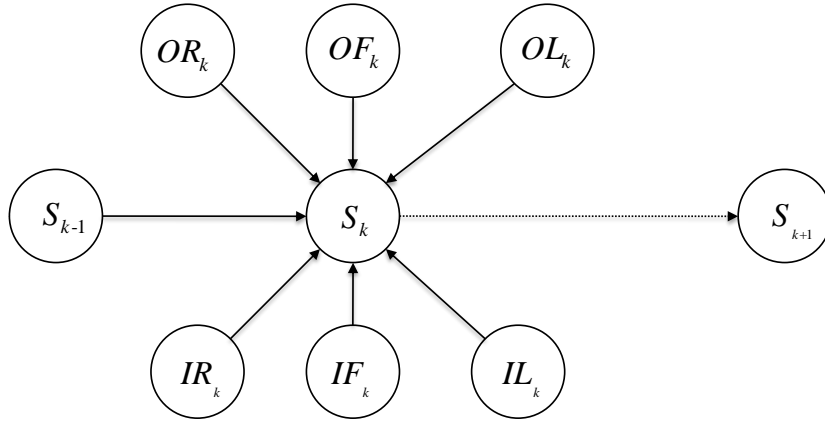


Fig.4.3 Bayesian Network (BN) model for crossroad intersection

このとき、 k [cycle] 時における東方向渋滞量の確率分布は、次のように表される [31] - [35]。

$$P(S_k) = \sum_{S_{k-1}} \sum_{IF_k} \sum_{IL_k} \sum_{IR_k} \sum_{OF_k} \sum_{OL_k} \sum_{OR_k} P(S_k, S_{k-1}, IF_k, IL_k, IR_k, OF_k, OL_k, OR_k) \quad (4.2)$$

ここで $\sum_{X_i} P(\dots, X_i, \dots)$ は、 $\sum_{x_i \in \mathcal{Q}_{X_i}} P(\dots, X_i = x_i, \dots)$ を意味する。

この結合確率分布 $P(S_k, S_{k-1}, IF_k, IL_k, IR_k, OF_k, OL_k, OR_k)$ は、乗法定理により次のように条件付き確率分布の積として表される。

$$\begin{aligned} P(S_k, S_{k-1}, IF_k, IL_k, IR_k, OF_k, OL_k, OR_k) = & \\ & P(S_k | S_{k-1}, IF_k, IL_k, IR_k, OF_k, OL_k, OR_k) P(S_{k-1} | IF_k, IL_k, IR_k, OF_k, OL_k, OR_k) \\ & \times P(IF_k | IL_k, IR_k, OF_k, OL_k, OR_k) P(IL_k | IR_k, OF_k, OL_k, OR_k) \\ & \times P(IR_k | OF_k, OL_k, OR_k) P(OF_k | OL_k, OR_k) \\ & \times P(OL_k | OR_k) P(OR_k) \end{aligned} \quad (4.3)$$

更に、d 分離性質 [34]、及び渋滞量 $P(S_k)$ が式 4.1 によって定まり

$$P(S_k | S_{k-1}, IF_k, IL_k, IR_k, OF_k, OL_k, OR_k) = 1 \quad (4.4)$$

となることを考慮すれば、次式のように簡単化される。

$$P(S_k) = \sum_{S_{k-1}} \sum_{IF_k} \sum_{IL_k} \sum_{IR_k} \sum_{OF_k} \sum_{OL_k} \sum_{OR_k} P(S_{k-1}) P(IF_k) P(IL_k) P(IR_k) P(OF_k) P(OL_k) P(OR_k) \quad (4.5)$$

これにより、各方向の流入量と流出量の事前確率分布が求まれば、主道路における渋滞量確率分布を算出することができる。

4.2.2 交通流入・流出量の事前確率分布の更新

十字路交差点交通量 BN 確率モデルを用いて異なる交通信号時の十字路交差点道路での渋滞量確率分布を予測するためには、交通流入・流出量の事前確率分布を更新する必要がある。まず、CA 交差点交通流モデルを用いて異なる交通信号時の交通流入・流出量を推定し、次に、推定交通量と測定された交通量を用いて事前確率分布を計算する。具体的な計算過程は、第3章で説明したので、ここでは省略する。

4.2.3 交通渋滞量確率分布最適化問題の定式化

ある十字路交差点の主道路（例えば、東西方向）における渋滞を解消するためには、主道路渋滞確率が小さくなるように、主道路の青信号現示時間を延長すればよい。しかしながら従道路では、その分赤時間が長くなるため、従道路渋滞量の確率が大きくなる。そこで、主道路の青信号現示に対して、主道路渋滞量の確率を小さくすると同時に、主道路の停車量が過小の場合は、従道路の赤信号時間が短くなるように主道路における過小停車量の確率も小さくする必要がある。この k [cycle] 時の信号現示と主道路における予測渋滞量確率分布に基づく十字路交差点交通信号制御のための交通渋滞量確率分布最適化問題は、次の式のように定式化できる。

$$F(phase_k^1, phase_k^2, phase_k^3) = \alpha \cdot \sum_{S_k=0}^{S_k=S_{\min}} \hat{P}(S_k) + \beta \cdot \sum_{S_k=S_{\max}}^{S_k=+\infty} \hat{P}(S_k) \rightarrow \text{MIN}$$

Subject to

$$\begin{aligned} phase_{\min}^1 &\leq phase_k^1 \leq phase_{\max}^1 \\ phase_{\min}^2 &\leq phase_k^2 \leq phase_{\max}^2 \\ phase_{\min}^2 &\leq phase_k^2 \leq phase_{\max}^3 \end{aligned} \quad (4.6)$$

$phase_k^1$: 主道路の青信号で、直進と左折車両を流出させる信号現示長

$phase_k^2$: 主道路の黄信号で、右折車両を流出させる信号現示長

$phase_k^3$: 主道路の赤信号で、従道路の車両を流出させる信号現示長

$\hat{P}(S_k)$: 信号現示が $(phase_k^1, phase_k^2, phase_k^3)$ 時の予測渋滞量確率分布

S_{min} : 主道路における過小停車量の設定値

S_{max} : 主道路における過多停車量の設定値

α : 主道路の重み係数

β : 主道路の重み係数

ここで、従道路の右折専用の信号現示 ($phase_k^4$) を設ける場合は、交通量が少ないため固定とするか、主道路の $phase_k^2$ と同じく設定し、また重み係数の α と β は、 $\alpha + \beta = 1$ として主道路と従道路の重要度によって設定する。

4.3 最適交通信号現示の探索

十字路における交通渋滞量確率分布最適化問題を解くためには、適切な最適化問題を解く手法が必要である。特に、サイクル毎に交通信号を調整する実時間制御を実現するためには、図 4.4 のように、 $phase_k^1$ の最小設定可能時間 $phase_{min}^1$ 以内に、次サイクルの信号現示長 $(phase_k^1, phase_k^2, phase_k^3)$ を決定する必要がある。

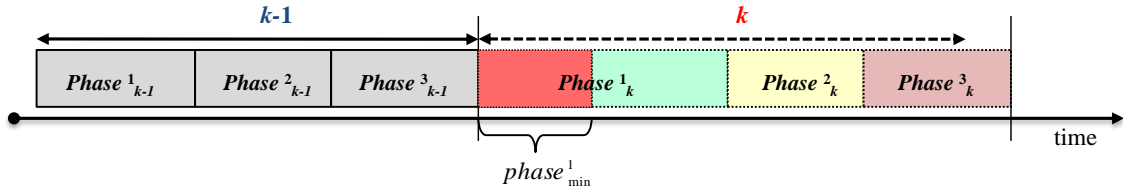


Fig.4.4 Calculation signal time for k cycle

毎回の探索において、交通流入・流出量を推定して事前確率分布を予測しながら渋滞確率分布を予測することを考慮すると、制限時間内で最適な交通信号を探索する必要がある。そこで、本章では、構造が簡単で計算時間が早い PSO 法を用いて交通信号の許容範囲内の最適交通信号を探索する。

4.3.1 Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO 法は、最適化問題を解く手法の一つであり。その他の手法として、Tabu Search、Simulated

Evolution、Genetic Algorithm などがある。それらの手法に比べ、PSO 法は、非常に簡単なアルゴリズムで、かつ基本的な算術演算しか使用していないにも関わらず、非線形関数最適化問題を高速に解くことができ、様々な分野の最適化問題に応用されている。

PSO 法 [43] は、James Kennedy らにより 1995 年に提案された鳥や魚、昆虫の群れが集団で行う探索行動に基づく最適化手法である。多数の粒子 (particle) によって群 (Swarm) を形成し、集団に含まれる個体同士の情報交換によって探索を進めるアルゴリズムである。PSO では多次元の設計変数空間上を固有の位置ベクトルと速度ベクトルを持つ個体と、個体と群の評価値によって各ベクトルを更新し、群れの動的挙動をモデル化している。

各粒子は、図 4.5 のように、これまでの探索における自身の最良の位置 ($pbest$) と、群全体で共有する最良の位置情報 ($gbest$)、及び粒子の速度に関する 3 つのベクトルを用いて、空間内で最適位置を探索するように速度と位置を更新しながら最適値を探索する方法である。

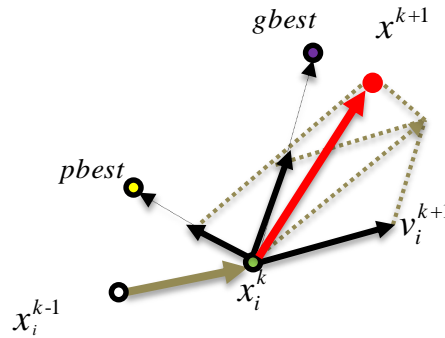


Fig.4.5 Location updating

以下に、各粒子の位置と速度の更新式を示す。

$$v_i^{itr+1} = w \cdot v_i^{itr} + c_1 \cdot rand() \cdot (pbest_i^{itr} - x_i^{itr}) + c_2 \cdot rand() \cdot (gbest^{itr} - x_i^{itr}) \quad (4.7)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (4.8)$$

i : 粒子の番号

itr : 探索回数

x : 粒子の位置

v : 粒子の速度

w : 速度に対する重み係数

c_1 : $pbest$ に対する重み係数

c_2 : $gbest$ に対する重み係数

$rand()$: 0～1 の一様乱数

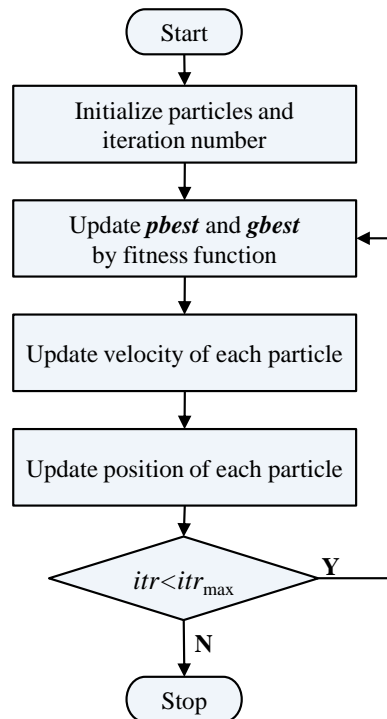


Fig.4.6 Procedure of PSO

PSO を用いた探索の処理手順のフローを図 4.6 に示す。

Step 1 : 初期化

粒子のサイズ、各粒子の初期位置と速度、最大探索回数など初期パラメータを設定する。

Step 2 : 評価

評価関数により、各粒子の評価値を計算し、 $pbest$ と $gbest$ を更新する。

Step 3 : 速度更新

式 (4.7) により、各粒子の速度を更新する。

Step 4 : 位置更新

式 (4.8) により、各粒子の位置を更新する。

Step 5 : 終了判定

最大探索回数に達すると終了を終了し、達していなければ、Step2に戻る。

一方、更新式の各パラメータを適当に調整し、探索空間内の粒子の移動パターンを変更することで、PSOの探索性能を向上させることができる [44、45、53、54]。基本的には、速度の係数と *gbest* 項の係数を調整する手法で、代表的方法として LDIWM と CFM がある。

A. LDIWM

LDIWM 法 [44] は、粒子の速度更新式の速度に対する重み係数 w を、式 (4.9) のように探索回数の増加に伴い減少させる方法である。ここで粒子の速度と位置更新式は、式 (4.7) と (4.8) をそのまま使う。この手法により、探索を重ねるごとに粒子の速度が減少していき、*gbest* 周辺でより細かい探索が期待できる。

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \frac{itr}{itr_{\max}} \quad (4.9)$$

w : 速度に対する重み係数

w_{\min} : 重み係数 w の最小値

w_{\max} : 重み係数 w の最大値

itr : 探索回数

itr_{\max} : 最大探索回数

B. CFM

CFM 法 [45] は、式 (4.10) ～ (4.13) のように *pbest* 項と *gbest* 項の係数に比べて粒子速度の係数を大きく設定することで、更新前の速度を中心に多様に変化させるので、より広い範囲での探索が期待できる。

$$v_i^{itr+1} = \chi \cdot [v_i^{itr} + c_1 \cdot rand() \cdot (pbest_i^{itr} - x_i^{itr}) + c_2 \cdot rand() \cdot (gbest^{itr} - x_i^{itr})] \quad (4.10)$$

$$x_i^{itr+1} = x_i^{itr} + v_i^{itr+1} \quad (4.11)$$

$$\chi = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (4.12)$$

$$\varphi = c_1 + c_2 \quad (4.13)$$

χ : 全体の重み係数

c_1 : $pbest$ に対する重み係数

c_2 : $gbest$ に対する重み係数

φ : 係数

4.3.2 PSO を用いた最適交通信号現示の探索

基本 PSO を用いて十字路交差点における交通渋滞量確率分布最適化問題に対する。

A. 探索空間と粒子の定義

探索空間は、各信号現示の設定可能範囲によって構成される。図 4.7 は、十字路の 3 つ信号現示 ($phase^1, phase^2, phase^3$) より構成された探索空間の例である。粒子の定義として、図 4.7 のような探索空間で、 i 番目の粒子は、 $x_i = (phase_i^1, phase_i^2, phase_i^3)$ となり、各信号現示長により構成されたベクトルである。群内の各粒子は、この探索空間で移動しながら、評価関数 $F(phase_i^1, phase_i^2, phase_i^3)$ の式 (4.6) により、評価値が最小となるような最適解を探索する。

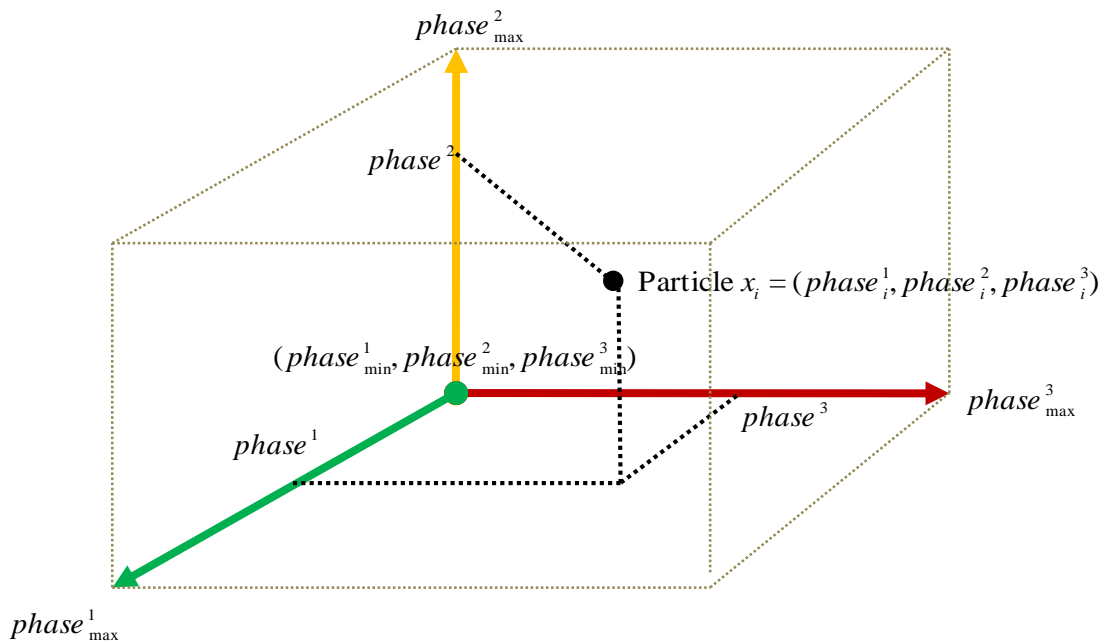


Fig.4.7 Search space and particle

B. 探索手順

十字路口交差点における交通渋滞量最適化問題に対して、基本 PSO を用いて $k-1$ [cycle] の交通信号が終了した時点で、測定交通量データに基づき、 k [cycle] における最適交通信号を探索する詳細な過程を図 4.8 に示す。

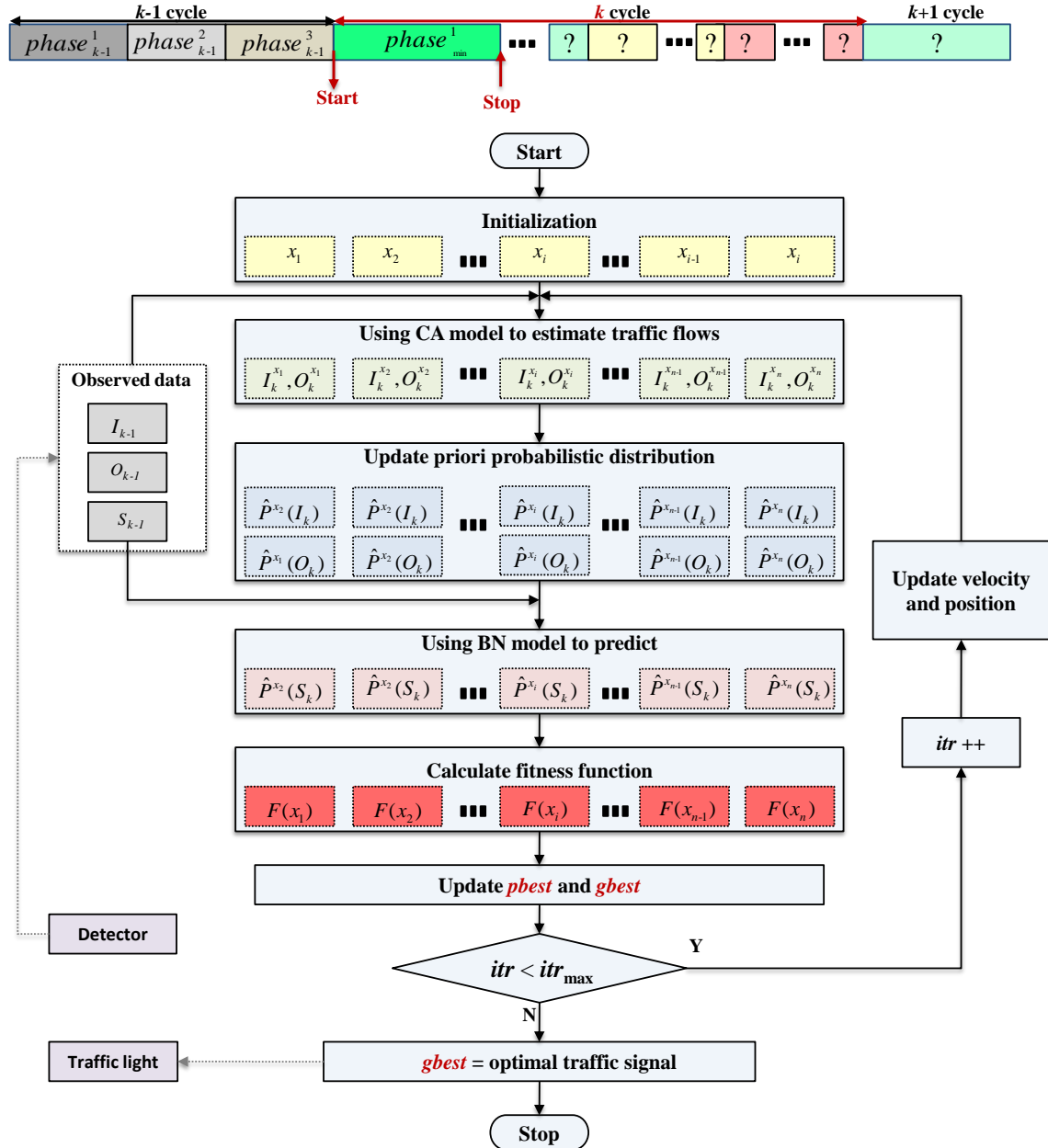


Fig.4.8 Procedure of optimal traffic signal searching using PSO

Step 1 : 初期設定

粒子群のサイズ分の初期粒子の位置と速度をランダム生成する。最大探索回数 itr_{\max} を設定し、探索回数 $itr = 0$ とする。

Step 2 : 交通量推定

CA 交差点交通流モデルを用いて k [cycle] 時の異なる粒子（各信号現示長）における交差点間道路への交通流入量と流出量を推定する。

Step 3 : 事前確率分布の更新

$k-1$ [cycle] までの測定データと、交通流入量及び流出量の推定値を用いて流入量事前確率分布と流出量事前確率分布を更新する。

Step 4 : 渋滞確率分布の予測

十字路交差点交通量 BN 確率モデルにより、 k [cycle] 時の交差点主道路における渋滞量確率分布を予測する。

Step 5 : 評価値計算

評価関数式 (4.6) により、各粒子の評価値を計算する。

Step 6 : ベスト値更新

各粒子の評価値により $pbest$ と $gbest$ を更新する。

Step7 : 分岐（終了判定）

最大探索回数以下の場合、次の処理を続き、最大探索回数に達したならば、Step10 の処理をする。

Step8 : パラメータリセット

探索回数 itr を+1 する。

Step9 : 粒子更新

式 (4.7)、(4.8)、(4.9) を用いて各粒子の速度と位置を更新し、Step 2 の処理をする。

Step10 : 出力

$gbest$ を最適交通信号として出力し、 k [cycle] の探索を終了する。

4.4 シミュレーション

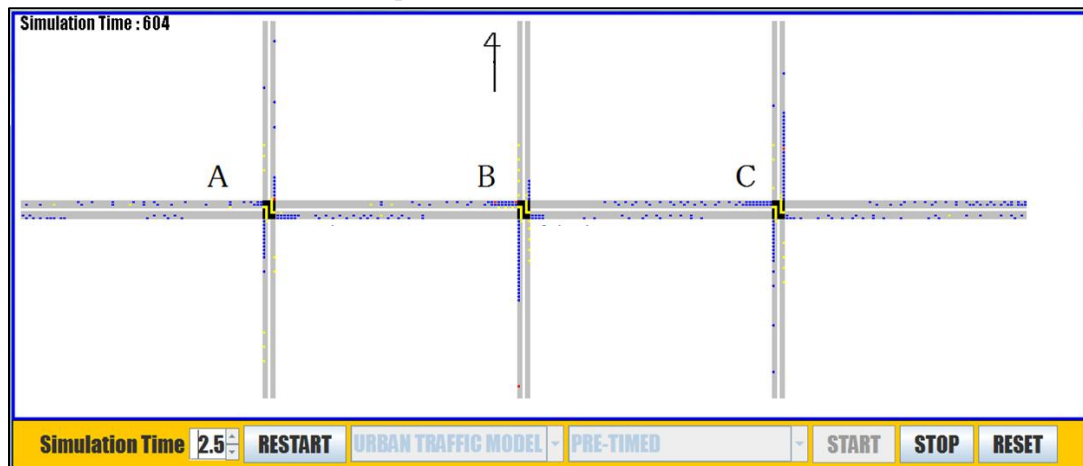
実時間交通信号制御法の有効性を検討するため、実際の十字路交差点を対象として、測定された交通データとマイクロシミュレータを用いたシミュレーションを行う。

4.4.1 測定データとマイクロシミュレータの設定

シミュレーション対象エリアは、北九州市八幡西区にある筒井町交差点で、図 4.9 (a) にその交差点の地図、(b) にシミュレータ画面の一例を示す。



(a) Map of Tutuimachi crossroad intersection



(b) Monitor of micro simulator

Fig.4.9 Tutuimachi crossroad intersection

交通量、及び信号時間の計測日時は、2008 年 1 月 17 日、午後 5 時から 7 時までで、この交差点は定周期信号制御方式である。このときの信号パラメータは、サイクル長 150 [sec] で 4 つの信号現示があり、それぞれの信号現示長と設定可能な範囲を表 4.1 に示す。一般に信号が変わるとき、交差点を通過中の車両を交差点内から流出させるために全赤信号を設定するが、ここではその時間を黄時間に含めた。信号現示 1 のときは、東西方向が青で南北方向が赤、また、信号現示 3 のときは、南北方向が青で東西方向が赤、信号現示 2 と 4 は右折専用である。信号現示 2 は東西方向が黄、南北方向は赤とする。信号現示 4 のときは、南北方向が黄、東西方向は赤とする。測定された実データは、交通量が多い東西方向と南北方向で、その中の一部を表 4.2 に示し、実道路と測定データに基づき設定したマイクロシミュレ

ータのパラメータを表 4.3 に示す。シミュレーション時間は、10,000 [step] である。また、表 4.4 には、評価関数における設定値を示す。

Table 4.1 Traffic signal parameters

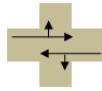
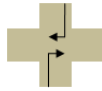
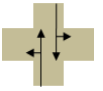
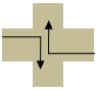
	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
				
Time [sec]	78	18	36	18
Min [sec]	60	10	30	10
Max [sec]	90	25	60	25

Table 4.2 Actual traffic data

Cycle	East to West						South to North					
	IF	IL	IR	OF	OL	OR	IF	IL	IR	OF	OL	OR
1	86	4	5	77	7	19	0	20	29	19	10	20
2	93	5	5	79	8	18	0	21	29	20	10	18
3	82	7	5	69	6	19	0	21	27	17	12	20
...					
46	92	3	5	72	8	14	0	21	29	18	12	21
47	91	2	5	59	9	20	0	21	29	15	11	20
48	89	3	5	72	8	24	0	20	28	18	11	21

Table 4.3 Parameters of micro simulator

Direction	East to West	West to East	South to North	North to South
Road Length	45	45	30	30
Right Turn Exclusive Lane	10	10	10	10
Number of Lanes	3	3	2	2
Inflow rate	0.2-0.3	0.1-0.15	0.1-0.15	0.1-0.15
Rate of Straight Vehicles	0.7	0.7	0.2	0.2
Rate of Left Turn Vehicles	0.2	0.2	0.5	0.3
Rate of Right Turn Vehicles	0.1	0.1	0.3	0.5

Table 4.4 Parameters of fitness function

S_{\min}	S_{\max}	α	β
30	60	0.3	0.7

4.4.2 従来法の設定

実時間制御について検討するため、最適解を求める組合せ最適化手法の一つである Genetic Algorithm (GA) [55] を用いて最適信号パラメータを探索した結果と比較する。

染色体のエンコーディングは、図 4.10 に示すように、整数値のエンコーディング法を用いる。1つの染色体は1つの交通信号の制御パラメータを表し、1つの遺伝子は4 [sec] から9 [sec] までの整数とする。遺伝子の合計はサイクル長を表し、各信号現示の時間は、対応する遺伝子の合計である。

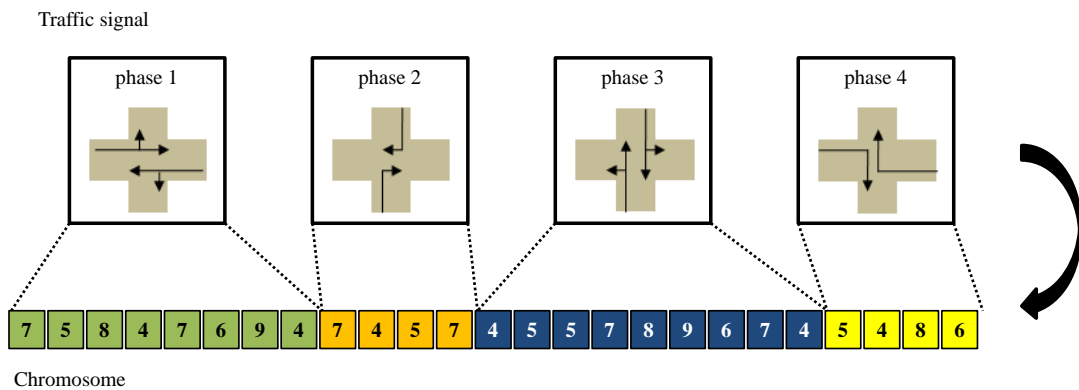


Fig.4.10 Example of a chromosome encoding

進化過程での選択処理は、収束速度を上げるためにエリート選択と Truncation 選択を組み合わせた手法 [56] を用いており、適応関数は PSO の評価関数である式 (4.9) を用いている。GA を用いた探索の処理過程は、次のようになる。

Step 1 : 初期化

染色体サイズ分の初期染色体をランダムに生成する。更に、最大探索回数を設定し、探索回数を 0 とする。

Step2 : 染色体の評価

式 (4.9) を用いて各染色体における評価値を計算する。

Step 3: エリート選択

全ての染色体を評価値が小さい順に並べ、評価値が最小となる染色体を次の世代とする。

Step 4 : Truncation 選択

残りの染色体の中で、評価値が大きい半数の染色体を淘汰させ、残り半数を用いて交叉と突然変異処理をする。

Step 5 : 交叉

ランダム選ばれた 2 個の染色体の中、6 個の遺伝子を交換する。ここで遺伝子の位置は、ランダムに決定する。

Step 6 : 突然変異

確率でランダムに選ばれた染色体に対して、3 個の遺伝子をランダムに変更する。ここで、遺伝子の位置はランダムに決定し、突然変異の確率は、0.1 とする。

Step 7 : 分岐処理

探索回数が最大探索回数より小さい場合は Step 2 の処理へ戻り、最大探索回数になると、次の処理に続く。

Step 8 : 終了

評価値が最小の染色体を最適交通信号とし、デコーディングする。

一方、交通信号制御の性能検討するための比較対象である従来法は、定周期制御法と交通信号調整法である。定周期制御法において、シミュレーションでは実交差点の信号パラメータをそのまま用いている。また、交通信号調整法 [29] において、過多停車量 S_{\max} と過小停車量 S_{\min} 、及び望ましい確率設定 P_{\min} と P_{\max} を表 4.5 に示す。

Table 4.5 Parameters of Adjusting algorithm

S_{\min}	S_{\max}	P_{\min}	P_{\max}
30	60	0.10	0.15

4.4.3 シミュレーション 1 : PSO と GA による探索時間の比較

PSO を用いた実時間制御の有効性を検討するために、PSO と Genetic Algorithm (GA) を用いて、同じ交通状況下で最適交通信号時間を探索するシミュレーションを行った。異なる個体数に対して、収束するまでの各 10 回の平均時間を表 4.6 に示す。一例として、個体数を 30

としたときの PSO と GA の評価値の収束状況を図 4.11 に示す。

Table 4.6 Comparison of calculation time

Method	Number of individuals	Mean calculation time [sec]	Best fitness
PSO	30	26	0.047
	50	30	0.047
	100	35	0.047
GA	30	109	0.047
	50	100	0.047
	100	90	0.047

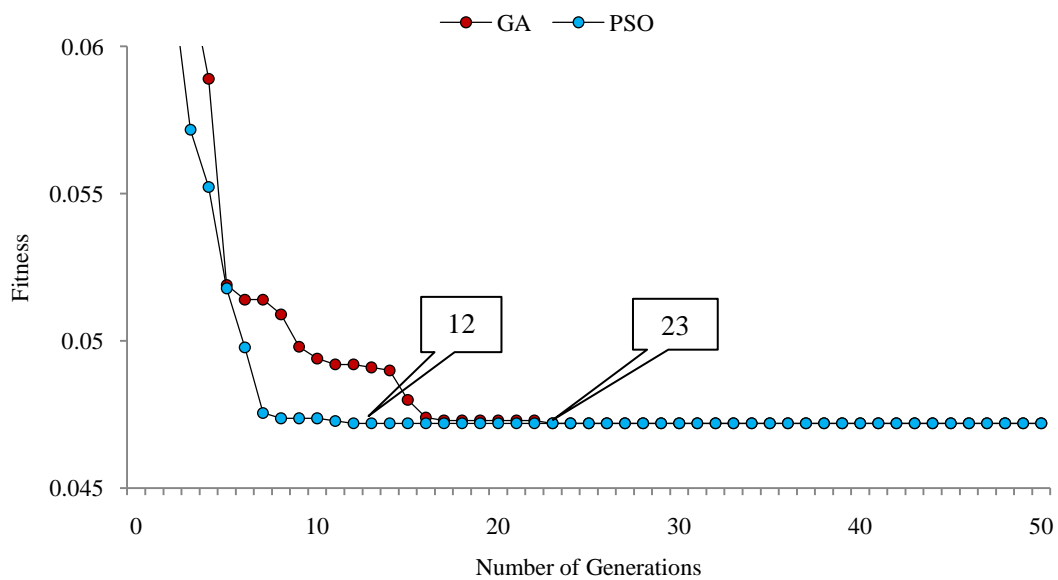


Fig.4.11 Fitness with generation of PSO and GA

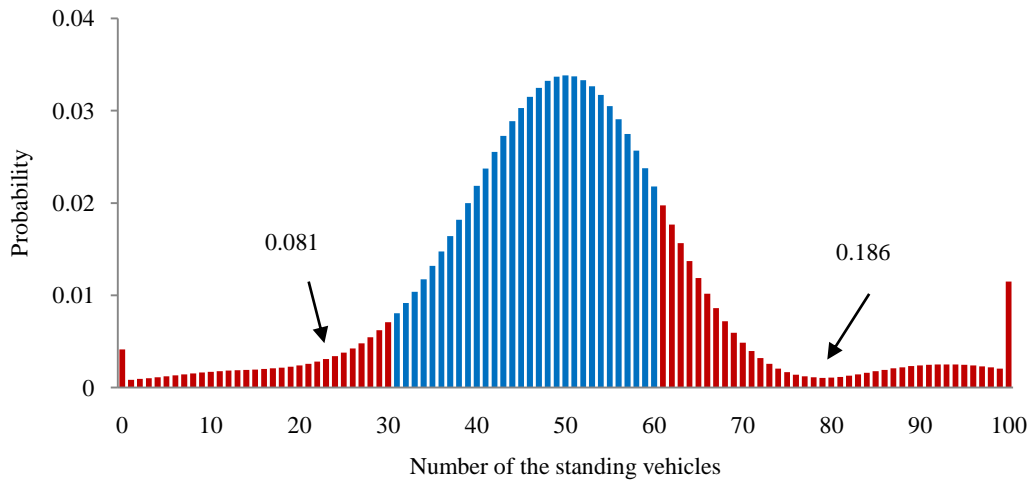
図 4.11 より、GA では最小値に収束するのに 23 世代要するが、PSO の場合は 12 世代で最小値に収束した。表 4.6 から、GA の場合は実時間制御のための最小実行時間 60 [sec] 以上を要したが、PSO の場合は約 35 [sec] で最適信号パラメータを探索できる。この結果は、PSO の最適値探索により、実時間制御が実現できることを示している。更に、PSO において粒子数が 30 個ときの計算時間が最短のため、以後のシミュレーションでは、粒子群のサイズを 30 とする。

4.4.4 シミュレーション2：従来の交通信号制御法との比較

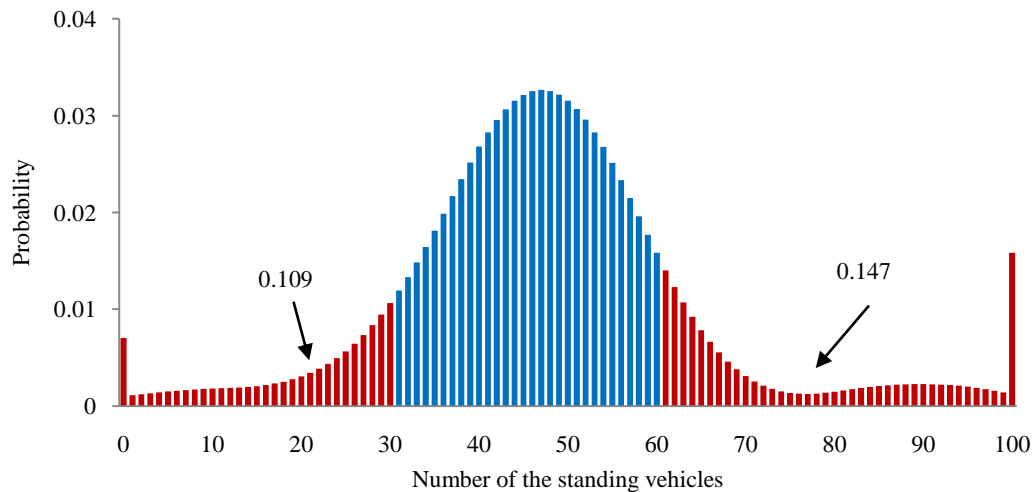
提案する実時間交通信号制御法の有効性を示すため、従来の定周期制御法、及び交通信号ルールベース型調整法を用いて対象十字路交差点の交通信号を制御した時の制御性能について比較検討を行った。

A. 渋滞量確率分布の推移と探索過程

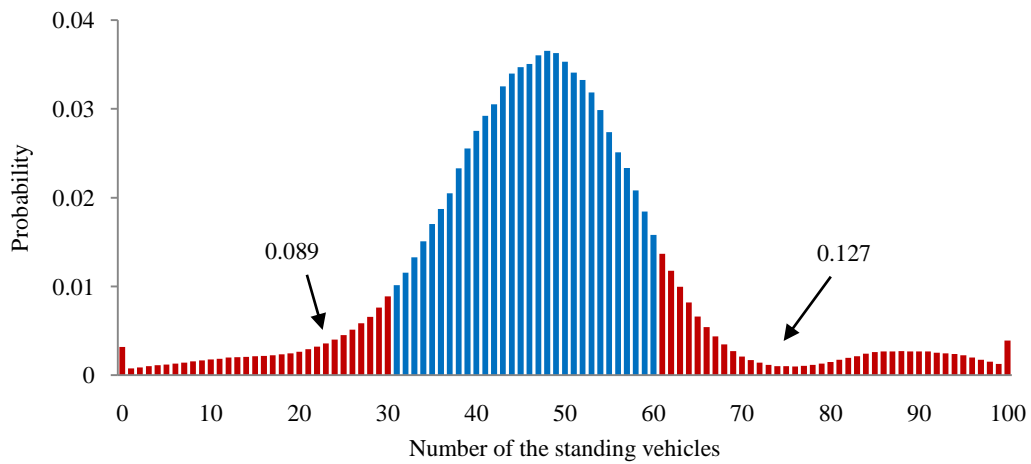
まず、制御過程について検討する。一例として、各制御方式による4[cycle]先の予測渋滞量確率分布を図4.12に示す。ここでは、交通信号ルールベース型調整法が確率の制限条件を満足した4[cycle]先の渋滞量確率分布を示している。



(a) Pre-timed



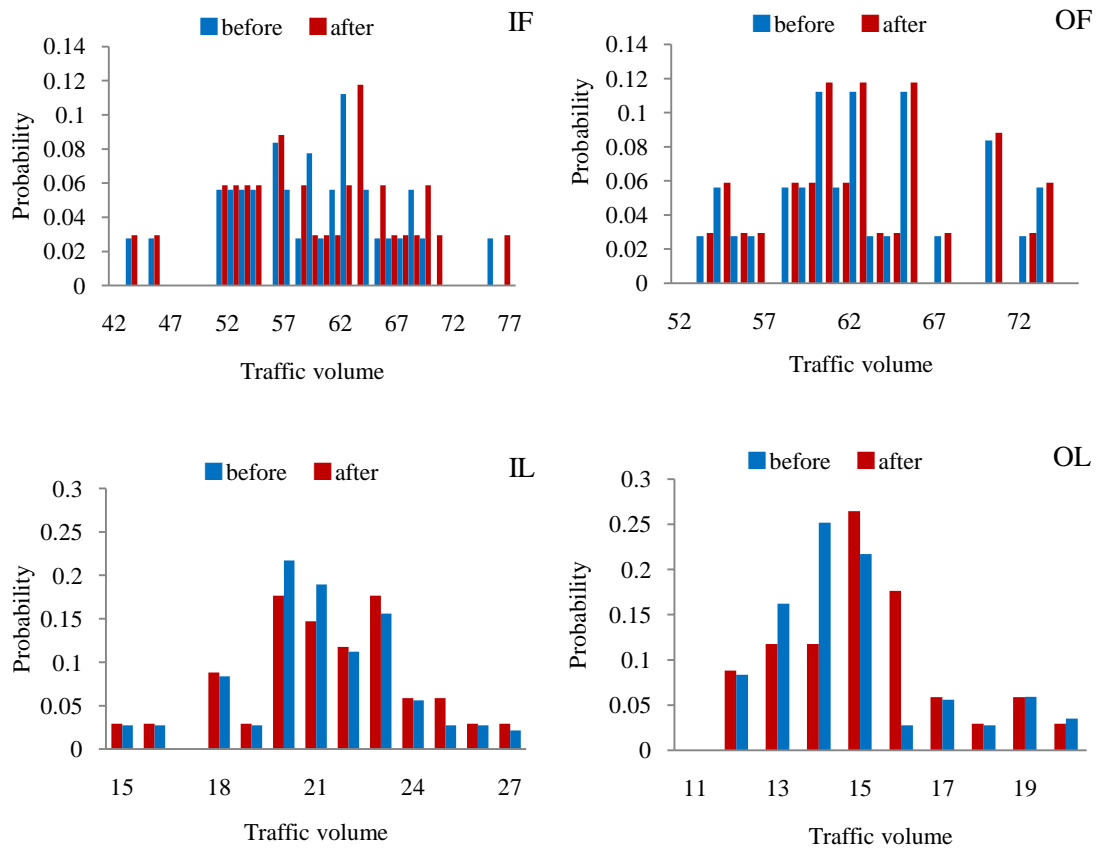
(b) Rule-based adjusting algorithm



(c) Proposed method

Fig.4.12 Probabilistic distributions of standing vehicles

尚、対象とした交差点間は 100 [cell] なので、予測渋滞量確率分布の計算過程で現れる 100 [台] 以上の渋滞量は 100 [台] に、また、負の停車量は 0 [台] と見なしている。図 4.12 は、提案法の過多停車量以上となる確率が最も小さいことを示している。



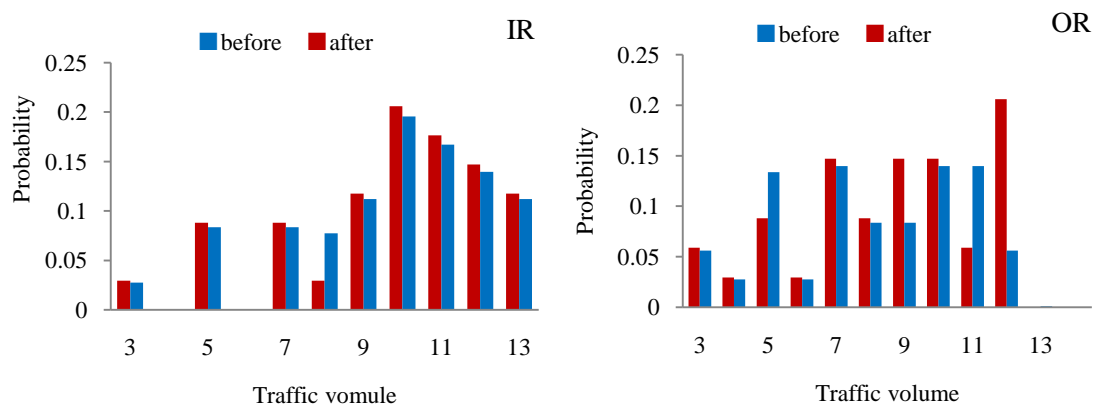


Fig.4.13 Prior probabilistic distributions of inflows and outflows

また、提案法により更新された事前確率分布を図 4.13 に示す。このように、交差点交通流入・流出量の事前確率分布はサイクル毎に更新され、この事前確率分布に基づき渋滞量の予測確率分布が求められる。更に、提案法の交通信号パラメータ算出過程における粒子の収束状況を図 4.14 に示す。ここでは、30 個の粒子の内 5 個を表示している。この図は、4 [cycle] 時において、粒子の位置 ($phase_i^1, phase_i^2, phase_i^3$ ($i=1,2,\dots,4,5$)) が、初期値 (例えば、 $i=1$ (86, 21, 61)) から最適値 (76, 16, 52) に収束する状況を示している。また、そのときの $pbest$ と $gbest$ の評価関数の収束状況を図 4.15 に示す。評価関数による評価値が最小値に収束することを示している。

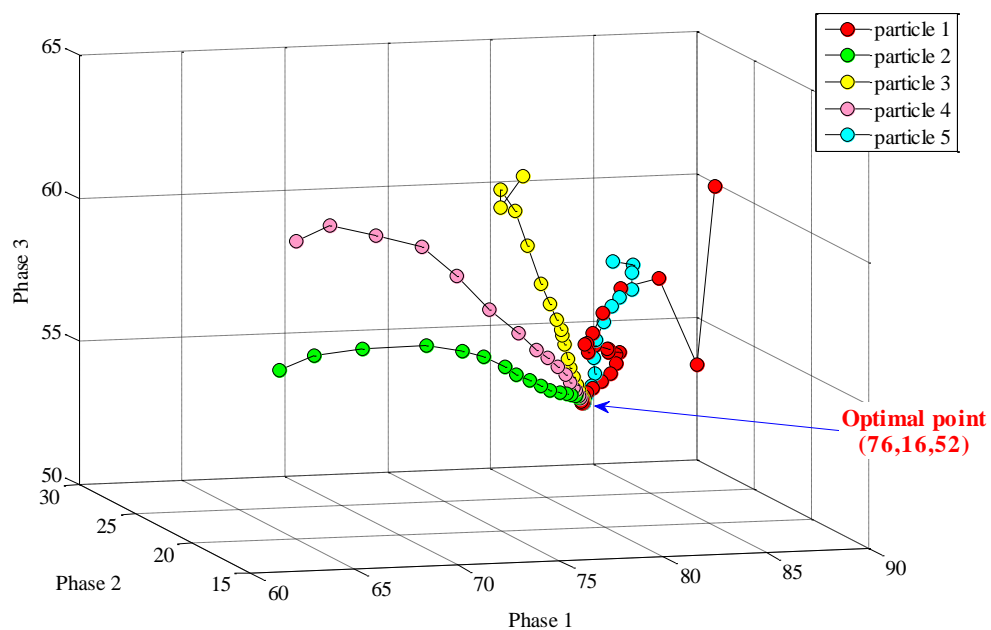


Fig.4.14 Position with generation

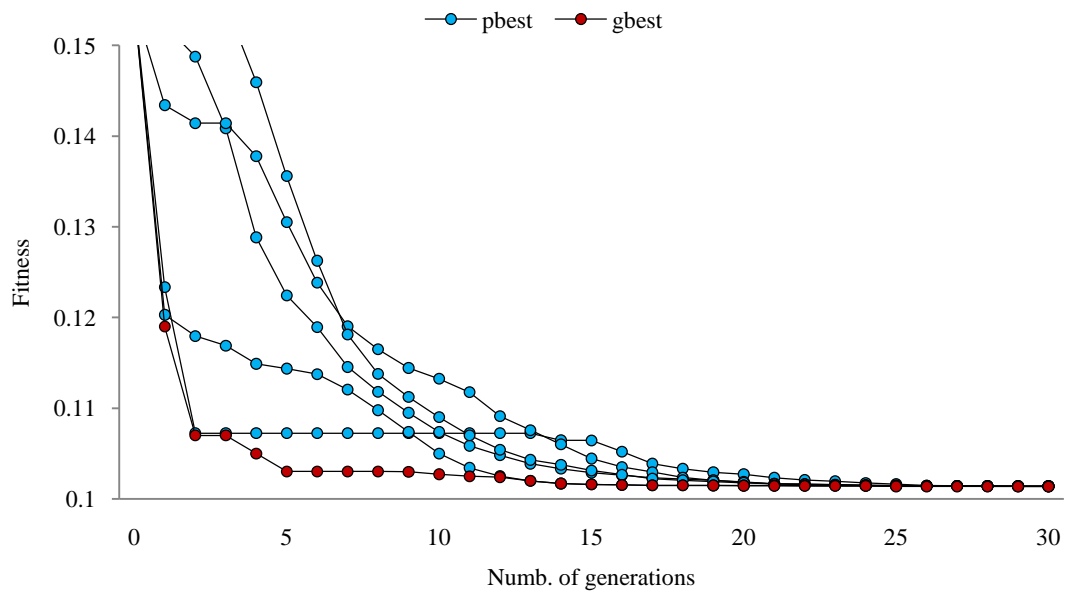
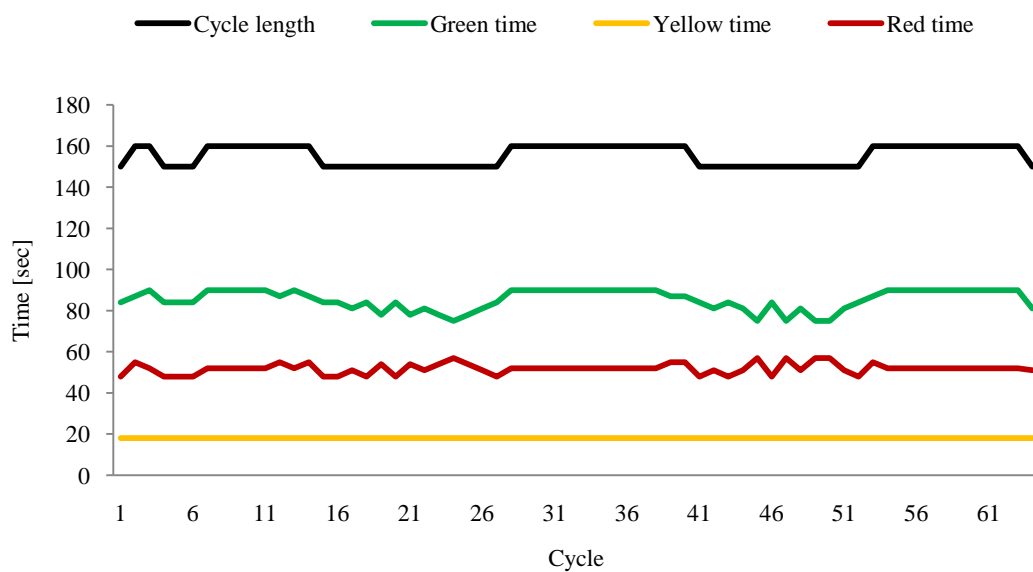
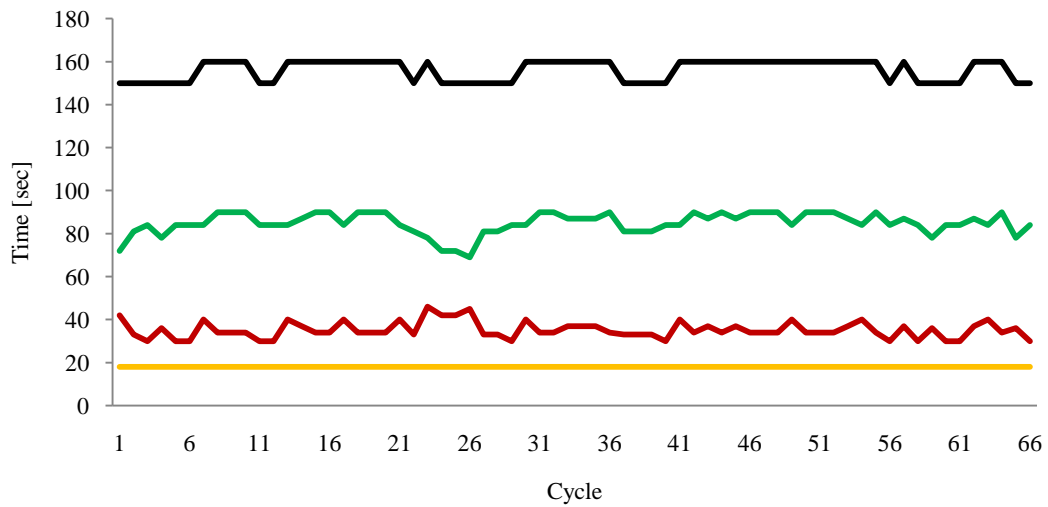


Fig.4.15 Fitness with generation

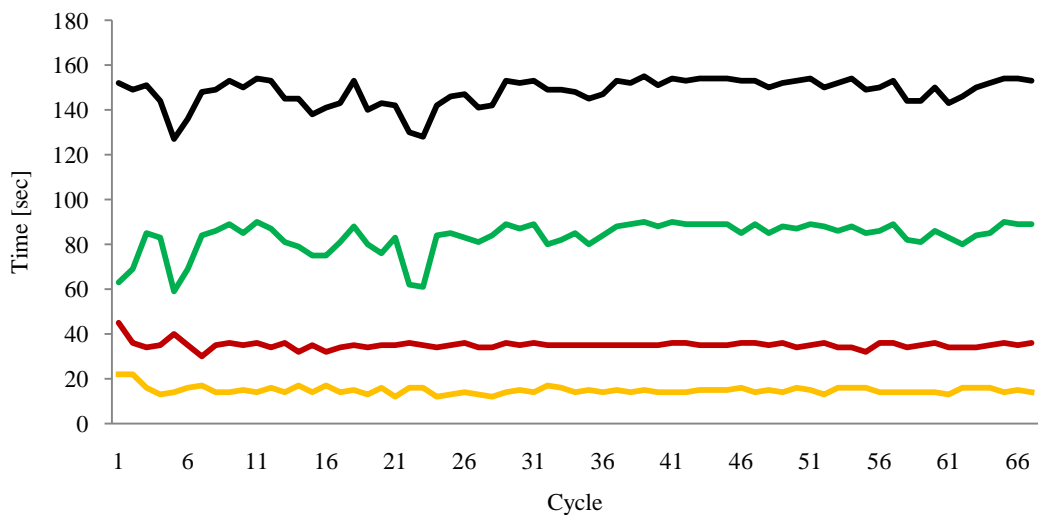
次に、定周期制御法と交通信号ルールベース型調整法、及び提案法により得られたサイクル長と各信号現示長を図 4.16 に示す。ここで、Green time が信号現示 1、Yellow time が信号現示 2、Red time が信号現示 3 である。この図から、提案法が交通信号の制御パラメータに対して、交通量に応じた適切な制御を実施しているのが分かる。更に、信号現示 2（右折専用時間）も制御していることが分かる。



(a) Pre-timed



(b) Rule-based adjusting algorithm

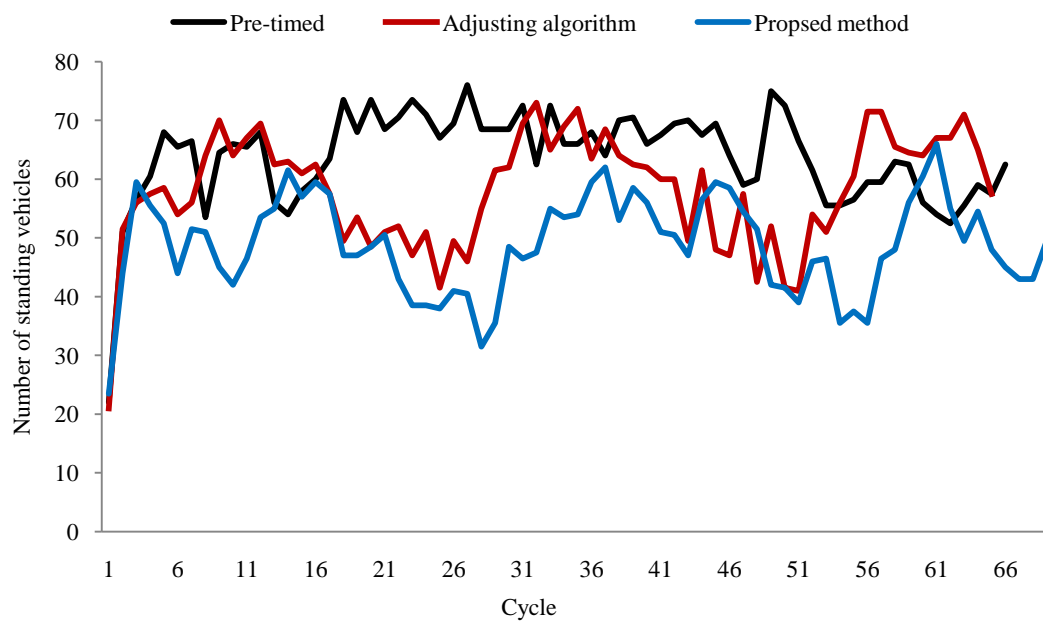


(c) Proposed method

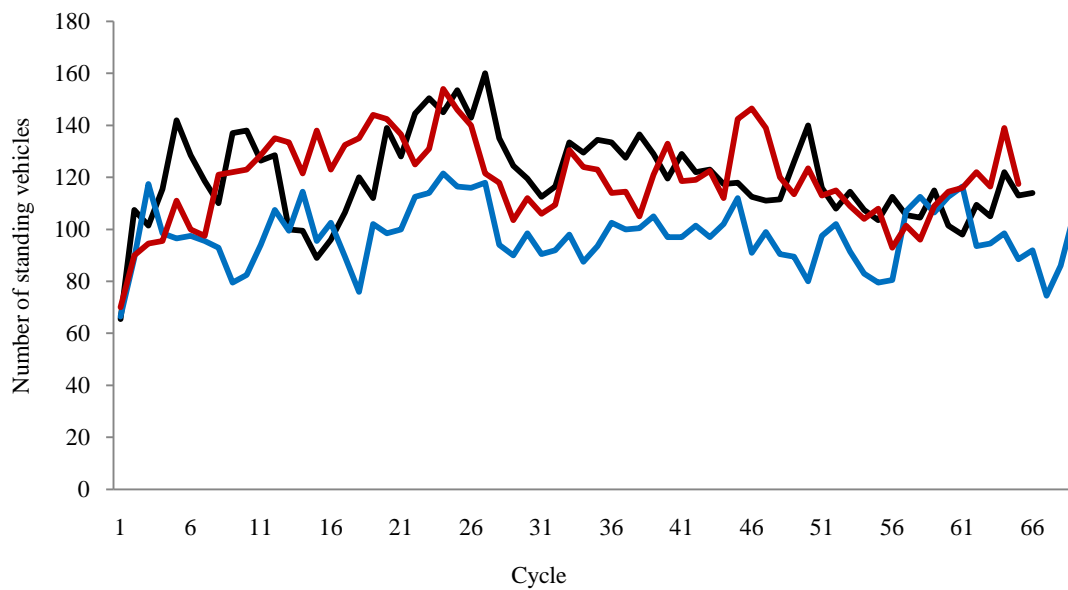
Fig.4.16 Comparison of traffic signals

B. 制御性能

制御性能の比較として、各サイクルの赤信号時の交差点における主道路での渋滞量の変化を図 4.17 (a) に、総渋滞量の変化を (b) に示す。これらの図から、提案法による制御は、定周期制御法と交通信号ルールベース型調整法に比べ、主道路、及び総渋滞量は最も少ないレベルで変動していることが分かる。



(a) Main road



(b) Total

Fig.4.17 Number of standing vehicles on main road

また、車両 1 [台] の平均遅れ時間の変化を図 4.18 に示す。提案法による制御は、定周期制御法と交通信号ルールベース型調整法に比べ、低いレベルを維持していることが分かる。

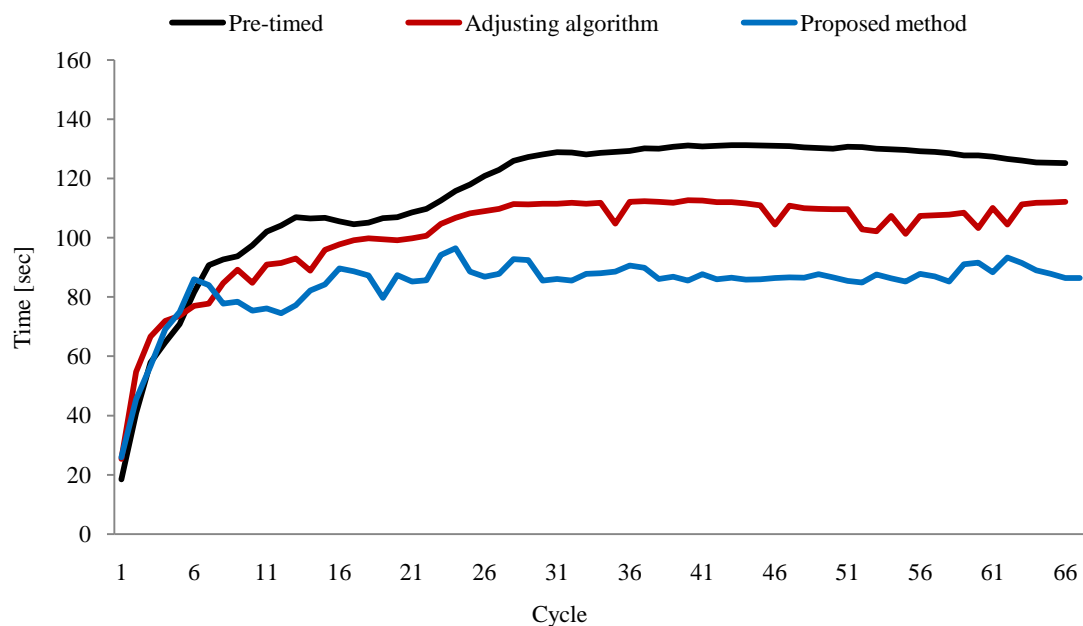


Fig.4.18 Mean delay time of each cycle

最後に、各手法を用いて対象十字路交差点の交通信号を制御した時の平均渋滞量、平均速度と平均遅れ時間を表 4.7 に示す。主道路における毎サイクルの平均渋滞量は、定周期制御法 129.9 [台]、交通信号ルールベース型調整法 120.1 [台]、提案法 114.7 [台] で、定周期制御に比べて 12 [%] 減少している。また、主道路と従道路での合計渋滞量も、定周期制御に比べて 7.7 [%] 減少している。また、提案法時の平均速度が最大の 26.7 [km/h] で、定周期制御に比べて約 2 [km/h] 向上している。更に、平均遅れ時間も提案法が最小となり、定周期制御より約 27.0 [%]、交通信号ルールベース型調整法より約 16.8 [%] 減少している。

Table 4.7 Comparison of Performance Index (PI)

Method		Pre-timed	Rule-based Adjusting algorithm	Proposed method
Mean number of standing vehicles	Main road	129.9	120.1	114.7
	Total	243.6	237.2	224.9
Mean Speed [km/h]		24.7	25.1	26.7
Mean delay time [sec]		115.2	101.1	84.1

4.5 まとめ

本章では、十字路交差点における交通渋滞量確率分布最適化のための実時間交通信号制御法を提案した。まず、十字路交差点交通量 BN 確率モデルを用いた予測渋滞量確率分布に基づき、十字路交差点における交通渋滞確率分布最適化問題を定式化した。次に、交通信号の実時間制御を実現するために、構造が簡単で処理速度が速い PSO を用いて最適な交通信号を探索した。最後に、北九州市八幡西区筒井町十字路交差点を対象とし、測定された実交通データとマイクロシミュレータを用いて 2 種類のシミュレーションを行い、PSO による実時間制御の有効性を示し、更に、渋滞量、平均速度、及び遅れ時間などの評価指標において、従来の交通信号制御法に比べ、有効であることを示した。

第 5 章

多差路交差点における実時間交通信号制御

5.1 はじめに

都心部での交通渋滞は、殆ど交差点部で発生し、交通事故の半数以上は交差点で発生しており、特に交差する道路が多い多差路交差点では、信号現示が複雑で交通量が多く、渋滞が発生しやすくなり、交通渋滞のボトルネックになっていることが指摘されている。本章では、十字路交差点の実時間交通信号制御法を拡張し、各道路の不規則に変動する交通量に応じて交通信号現示を制御する多差路交差点交通信号の実時間確率的最適制御法について述べる。その構造を図 5.1 に示す。

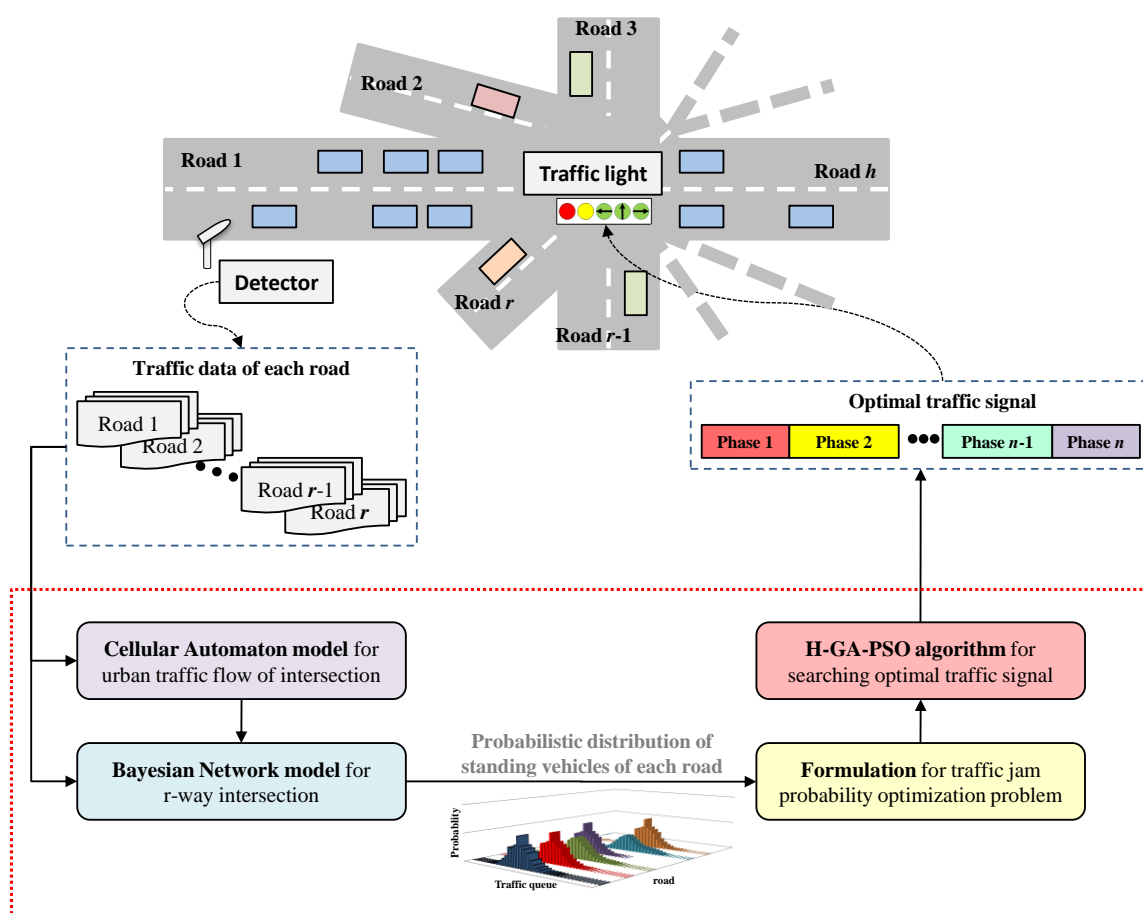


Fig.5.1 Structure of proposed real-time traffic signal control method for r-way intersection

多差路交差点において、全ての信号現示を制御するためには、複数の道路における渋滞確率を考慮して交通渋滞量確率分布最適化問題を定式化する必要がある。そこで、新たに多差路交差点交通量 Bayesian Network (BN) 確率モデルを構築し、各道路での渋滞量確率分布を予測する。次に、予測渋滞量確率分布を用いて計算した各道路での渋滞確率に基づき、多差

路交差点における交通渋滞量確率分布最適化問題を定式化し、最適な信号現示長を探索する。しかしながら、十字路交差点に比べ評価値の計算時間が長くなるので、基本 PSO を用いて実時間に最適な信号現示を探索するためには、自ずとその粒子数と探索回数が制限される。この基本 PSO による探索は、収束が速い反面、粒子自身の最良位置 (*pbest*) と全粒子の最良位置 (*gbest*) を基に各粒子の速度を更新するので、全粒子は *gbest* を向けて収束し、従って、粒子数が少ない場合は、局所解に陥る可能性が高くなる。階層型 PSO (Hierarchical-PSO) による探索は、局所解に陥りやすい問題回避に適している反面、収束に長い時間を要する欠点がある。そこで、多差路交差点の実時間交通信号制御を実現するために、従来の H-PSO に Genetic Algorithm (GA) 演算を導入した H-GA-PSO アルゴリズムを提案する。この H-GA-PSO アルゴリズムは、H-PSO と同じ構造であるが、早い収束速度を実現するために、元の粒子更新式を改良しており、同時に、局所解に陥る問題を回避するために、初期粒子生成法と各粒子の多様性をもたらす GA 演算を導入して粒子の位置を更新する。最後に、実交通データとマイクロシミュレータを用いた 3 種類のシミュレーションにより、H-GA-PSO アルゴリズムによる交通信号制御法の有効性を示す。

5.2 多差路交差点交通量 BN 確率モデルの構築と交通渋滞量確率分布最適化問題の定式化

多差路交差点における交通信号の実時間制御のために、本節では、多差路交差点交通量 BN 確率モデルを構築すると共に、このモデルを用いて予測した各道路での渋滞量確率分布に基づき、多差路交差点における交通渋滞量確率分布最適化問題について定式化する。

5.2.1 多差路交差点交通量 BN 確率モデルの構築

図 5.2 のような r 差路交差点を対象とした時、 k [cycle] 時の道路 h の流入量と流出量、及び渋滞量の間には、式 (5.1) のような関係が成立つ。

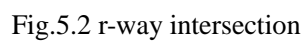
$$S_k^h = S_{k-1}^h + IR_k^h + IF_k^h + IL_k^h - \sum_{j=1; j \neq h}^r O_k^j \quad (5.1)$$

S_k^h : k サイクル時の道路 h の渋滞量

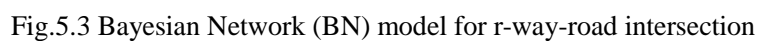
S_{k-1}^h : $k-1$ サイクル時の道路 h の渋滞量

IL_k^h : k サイクル時の道路 h への左折流入量

IF_k^h : k サイクル時の道路 h への直進流入量

O_k^j : k サイクル時の道路 h から道路 j への流出量

一方、 r 差路交差点における交通流入量、流出量、及び渋滞量を確率変数と見なすと、それらの確率変数の因果関係より、図 5.3 のような BN 確率モデルが構築できる。



この時、 k [cycle] 時の道路 h における渋滞量確率分布は、次のように表わされる。

$$P(S_k^h) = \sum_{S_{k-1}^0} \sum_{IR_k^h} \sum_{IF_k^h} \sum_{IL_k^h} \sum_{O_k^1} \sum_{O_k^2} \cdots \sum_{O_k^{h-1}} \sum_{O_k^{h+1}} \cdots \sum_{O_k^{r-1}} \sum_{O_k^r} P(S_k^h, S_{k-1}^h, IR_k^h, IF_k^h, IL_k^h, O_k^1, O_k^2, \dots, O_k^{h-1}, O_k^{h+1}, \dots, O_k^{r-1}, O_k^r) \quad (5.2)$$

ここで、 $\sum_{X_i} P(\dots, X_i, \dots) = \sum_{X_i \in \Omega_{X_i}} P(\dots, X_i = x_i, \dots)$ である。また、乗法定理によって周辺確率分布は、式 (5.3) のように表すことができる。

$$\begin{aligned} P(S_k^h, S_{k-1}^h, IR_k^h, IF_k^h, IL_k^h, O_k^1, O_k^2, \dots, O_k^{h-1}, O_k^{h+1}, \dots, O_k^{r-1}, O_k^r) = \\ P(S_k^h | S_{k-1}^h, IR_k^h, IF_k^h, IL_k^h, O_k^1, O_k^2, \dots, O_k^{h-1}, O_k^{h+1}, \dots, O_k^{r-1}, O_k^r) \\ \times P(S_{k-1}^h | IR_k^h, IF_k^h, IL_k^h, O_k^1, O_k^2, \dots, O_k^{h-1}, O_k^{h+1}, \dots, O_k^{r-1}, O_k^r) \\ \times P(IR_k^h | IF_k^h, IL_k^h, O_k^1, O_k^2, \dots, O_k^{h-1}, O_k^{h+1}, \dots, O_k^{r-1}, O_k^r) \\ \times P(IF_k^h | IL_k^h, O_k^1, O_k^2, \dots, O_k^{h-1}, O_k^{h+1}, \dots, O_k^{r-1}, O_k^r) \\ \times P(IL_k^h | O_k^1, O_k^2, \dots, O_k^{h-1}, O_k^{h+1}, \dots, O_k^{r-1}, O_k^r) \\ \times P(O_k^1 | O_k^2, \dots, O_k^{h-1}, O_k^{h+1}, \dots, O_k^{r-1}, O_k^r) \\ \times P(O_k^2 | O_k^3, \dots, O_k^{h-1}, O_k^{h+1}, \dots, O_k^{r-1}, O_k^r) \cdots \\ \times P(O_k^{r-1} | O_k^r) P(O_k^r) \end{aligned} \quad (5.3)$$

d 分離性質、及び交通入出量と渋滞量間の関係式が $P(S_k^h | S_{k-1}^h, IR_k^h, IF_k^h, IL_k^h, O_k^1, O_k^2, \dots, O_k^{h-1}, O_k^{h+1}, \dots, O_k^{r-1}, O_k^r) = 1$ となることを考慮すれば、式 (5.2) は式 (5.4) のように簡単化される。

$$P(S_k^h) = \sum_{S_{k-1}^0} \sum_{IR_k^h} \sum_{IF_k^h} \sum_{IL_k^h} \sum_{O_k^1} \sum_{O_k^2} \cdots \sum_{O_k^{h-1}} \sum_{O_k^{h+1}} \cdots \sum_{O_k^{r-1}} \sum_{O_k^r} P(S_{k-1}^h) P(IR_k^h) P(IF_k^h) P(IL_k^h) P(O_k^1) P(O_k^2) \cdots \times P(O_k^{h-1}) P(O_k^{h+1}) \cdots P(O_k^{r-1}) P(O_k^r) \quad (5.4)$$

各道路の交通流入量と流出量の事前確率分布が求めれば、式 (5.4) を用いて道路 h での渋滞量確率分布を算出することができる。

5.2.2 交通流入・流出事前確率分布の更新

交通流入・流出量の事前確率分布の更新は、まず、CA 交差点交通流モデルを用いて異なる交通信号時の交通流入・流出量を推定し、次に、推定交通量と測定された交通量を用いて事前確率分布を予測する。

CA 交差点交通流モデルを用いて交通量を推定する時、十字路交差点の場合、右折車両の

進行方向は1方向のみであるが、多差路交差点においては、右折車両の進行方向が交差点の構造によって異なるため、右折車両の範囲について設定する必要がある。例えば、図 5.4 のような6差路交差点の場合、道路1における右折車両は、道路4と道路5へ移動する進行方向が4と5の車両である。一方、道路2における右折車両は、道路1方向へのみ移動可能である。また、道路の構造により右折専用レーンが無い道路もあるので、各道路での車両に対して、実際の交差点構造に基づき右折車両の範囲を設定する。流入確率、進行方向の比率など、他の設定パラメータは、第3章と同様とする。

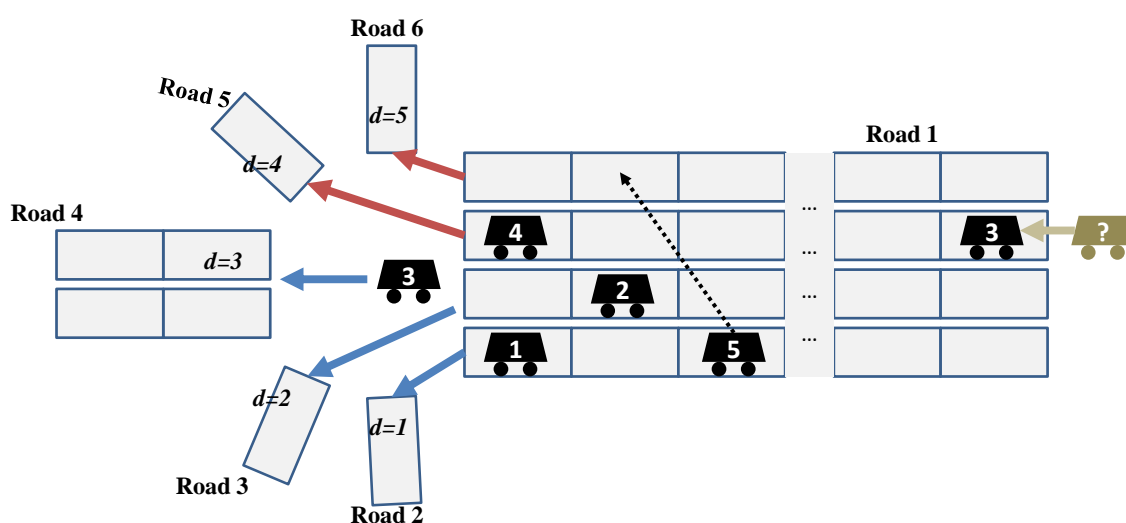


Fig.5.4 An example of a CA model for 6-way intersection

5.2.3 多差路交差点交通渋滞量確率最適化問題の定式化

交差点における各道路での渋滞量は、各道路の車両に通過権を与える信号現示長とサイクル長により異なる。第4章では、主に3つ信号現示を持つ十字路交差点を制御対象としているので、主道路のみでの交通渋滞量確率分布最適化により、主道路における信号現示1（東西方向道路の直進と左折車両に通過権を与える信号）と信号現示2（東西方向道路の右折車両に通過権を与える信号）を制御すると共に、サイクル長を調整することで、従道路における信号現示3（南北道路の車両に通過権を与える信号）を制御することで十分であった。しかし、多差路交差点においては、信号現示の増加に伴い、全ての信号現示を制御するためには、複数の道路での渋滞量確率を考慮する必要がある。多差路交差点交通信号制御のための交通渋滞量確率分布最適化問題を、次のように定式化する。

$$F(phase^1, phase^2, ..., phase^{n-1}, phase^n) = \sum_{h=1}^r \psi^h \cdot [\alpha \cdot \sum_{S_k^h=0}^{S_k^h=S_{\min}^h} \hat{P}(S_k^h) + \beta \cdot \sum_{S_k^h=S_{\max}^h}^{+\infty} \hat{P}(S_k^h)] \rightarrow \text{Min} \quad (5.5)$$

Subject to

$$phase_{\min}^i \leq phase^i \leq phase_{\max}^i \quad i=1, 2, \dots, n$$

i : 信号現示の番号

n : 信号現示の種類

h : は道路番号

$phase^i$: i 番目の信号現示の表示時間

$phase_{\min}^i$: i 番目の信号現示の最小時間限度

$phase_{\max}^i$: i 番目の信号現示の最大時間限度

$\hat{P}(S_k^h)$: 道路 h における信号現示が $(phase^1, phase^2, \dots, phase^{n-1}, phase^n)$ 時の予測渋滞量確率分布

S_{\min}^h : 道路 h の過少停車量設定値

S_{\max}^h : 道路 h の渋滞設定値

ψ^h : 道路 h の重み係数

α^h : 道路 h の重み係数

β^h : 道路 h の重み係数

ここでは、 S_{\max}^h 以上の停車量を渋滞とする。道路 h において、各車線での停車長はほぼ等しいと見なすと、停車量 S_k^h は、車線数 Ln^h と停車長 Ql^h を用いて

$$S_k^h = Ln^h \cdot Ql^h \quad (5.6)$$

と表されるので、渋滞設定値 S_{\max}^h は、停車長のある設定値 Ql_{\max}^h によって定まる。この渋滞設定値 S_{\max}^h と、予測された渋滞量確率分布 $\hat{P}(S_k^h)$ を用いて道路 h での渋滞確率分布を算出することができる。また、重み係数 ψ^h 、 α^h 、 β^h は、交通量が多い主道路や渋滞道路を優先的に解消させるために、各道路の重要度により設定する。式 (5.5) は、交差点交通渋滞量確率分布最適化問題の一般式であり、十字路交差点において 3 つの信号現示のみ考慮した場合は、交通量が多い主道路方向での予測渋滞量確率分布のみで定式化できるため、 $r=1$ とする。一方、十字路交差点において 3 つ以上の信号現示を考慮する場合と多差路交差点の場合は、複数の道路の予測渋滞量確率分布を用いるため、 $r>1$ となり、 $\alpha^h=0$ とする。

5.3 H-GA-PSO アルゴリズムと最適交通信号現示の探索

提案法は、 $k-1$ [cycle] までの測定データを用いて多差路交差点の渋滞量確率を最小とする k [cycle] 時の信号現示を探索する。信号現示は、あまり短くすると安全性に支障をきたすので、青信号時間の最小限度が必要であり、逆にあまり長くすると、交通状況によっては通過車両が無いにも拘らず青信号のままであり続けるロス時間の発生や、また、他道路で赤信号により停車している運転手の精神的負担も考慮し、青信号時間の最大限度も必要となる。最長の信号現示をサイクルの初めとし、 k [cycle] 時の最適な交通信号を決定するためには、図 5.5 のように、最長信号現示 1 の最小限度 ($phase_{min}^1$) に全ての処理を終了する必要がある。

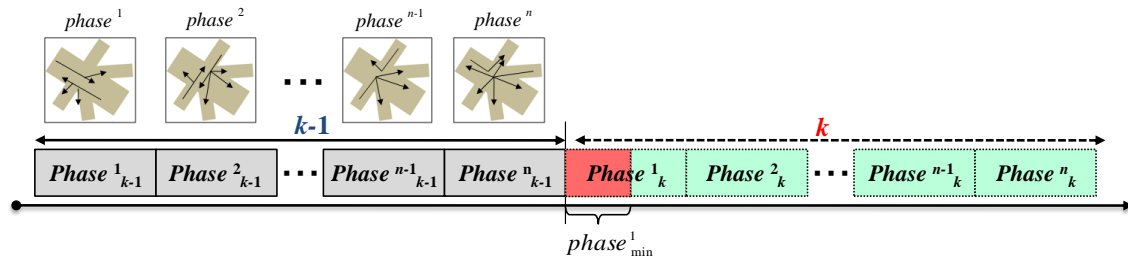


Fig.5.5 Calculation signal time for k-cycle

本研究では、構造が簡単で計算時間が早い PSO を用いて適切な交通信号を求めることにする。また、多差路交差点の最適信号現示を決定するためには、すべての道路の予測渋滞量確率分布に基づく評価関数を設定する必要がある。これにより、十字路交差点の交通信号制御に比べ評価値計算時間が長くなるので、制限時間 $phase_{min}^1$ 内に k [cycle] 時の最適な信号現示を算出するためには、PSO における粒子数を相対的に少なくする必要がある。このような場合、基本 PSO 法による探索は、局所解に陥る可能性が高くなる。一方、従来の階層型 H-PSO 法による探索は、収束に長い時間を要する。そこで、実時間に最適な交通信号を求めるためには、適切な粒子数を設定し、多様な探索を行いながら制限時間内で最適値に収束する新たな探索法が必要となる。そこで本章では、H-PSO を基に改良した H-GA-PSO アルゴリズムを提案する。

5.3.1 階層型 PSO (H-PSO)

基本 PSO は Global best モデルと言われ、図 5.6 のように、 $gbest$ はただ一つであるため、

収束が速い。しかし、 $gbest$ が更新されると各粒子は急速に $gbest$ 付近に集まるので、局所解に陥りやすい傾向がある。この点を考慮し、図 5.7 のような Local best モデルとされている階層型 PSO 法 [46] は、共有情報を数個の粒子間に限定させて、より広い領域での探索を実現することで局所解に陥りにくくする方法である。具体的には、粒子を幾つかのグループに分割し、各グループの中の最良値を持つ粒子を上位層、その他の粒子を下位層とする。その構造を図 5.8 に示す。

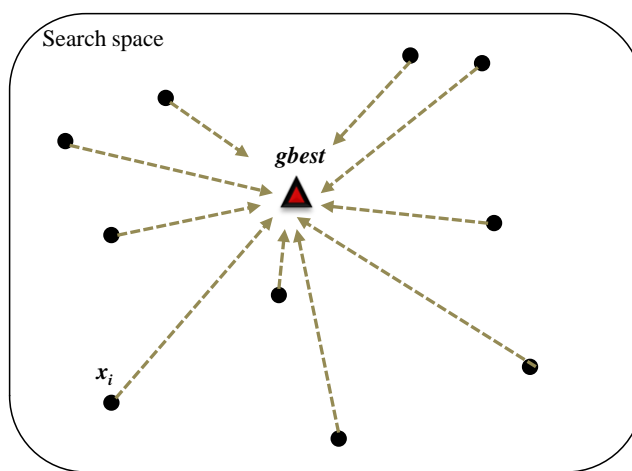


Fig.5.6 Simple PSO (Global best model)

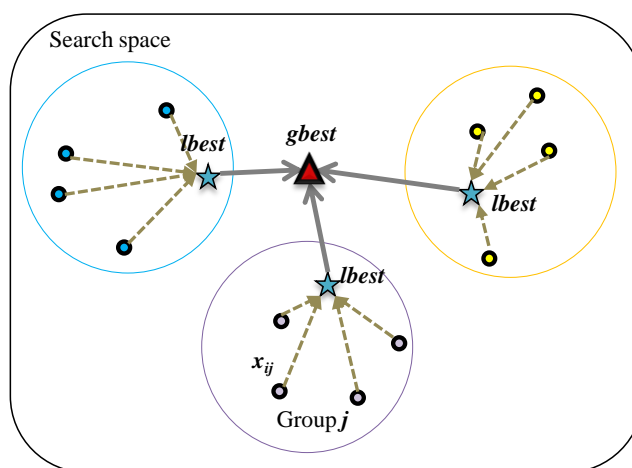


Fig.5.7 Hierarchical-PSO (Local best model)

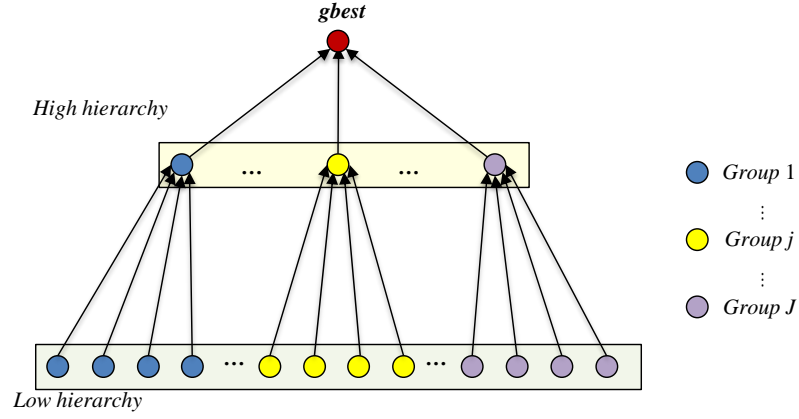


Fig.5.8 Structure of Hierarchical-PSO

下位層の粒子は、上位粒子の位置 $lbest$ と $pbest$ を基に、次の式を用いて粒子の位置と速度を更新する。ここで、 $lbest$ は、上位層粒子の最良の位置情報である。

$$v_{ij}^{itr+1} = w_l \cdot v_{ij}^{itr} + c_{l1} \cdot rand() \cdot (pbest_{ij}^{itr} - x_{ij}^{itr}) + c_{l2} \cdot rand() \cdot (lbest_j^{itr} - x_i^{itr}) \quad (5.7)$$

$$x_{ij}^{itr+1} = x_{ij}^{itr} + v_{ij}^{itr+1} \quad (5.8)$$

上位層の粒子は、 $pbest$ と $gbest$ を基に、次の式を用いて粒子の位置と速度を更新する。

$$v_j^{itr+1} = w_h \cdot v_j^{itr} + c_{h1} \cdot rand() \cdot (pbest_j^{itr} - x_j^{itr}) + c_{h2} \cdot rand() \cdot (gbest^{itr} - x_j^{itr}) \quad (5.9)$$

$$x_j^{itr+1} = x_j^{itr} + v_j^{itr+1} \quad (5.10)$$

i : 粒子の番号

j : グループの番号

itr : 探索回数

x : 粒子の位置

v : 粒子の速度

w_l : 下位層の速度に対する重み係数

w_h : 上位層の速度に対する重み係数

c_{l1} : 下位層の $pbest$ に対する重み係数

c_{l2} : 下位層の $lbest$ に対する重み係数
 c_{h1} : 上位層の $pbest$ に対する重み係数
 c_{h2} : 上位層の $gbest$ に対する重み係数
 $rand()$: 0~1 の一様乱数

H-PSO を用いた探索処理の手順は次のようになり、そのフローを図 5.9 に示す。

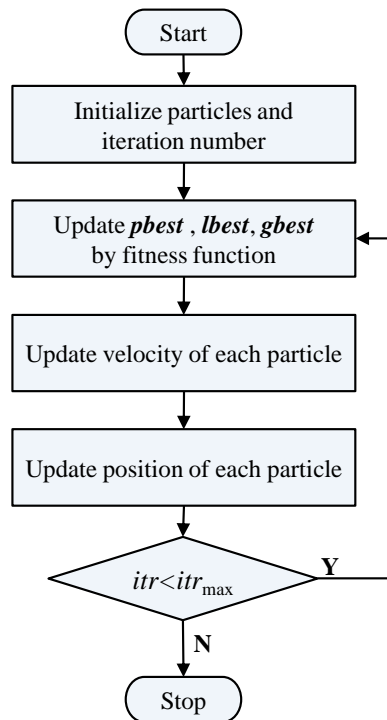


Fig.5.9 Procedure of Hierarchical-PSO

Step 1 : 初期化

グループ数と各グループの粒子サイズ、各粒子の初期位置と速度、最大探索回数など初期パラメータを設定する。

Step 2 : 評価

評価関数により、各粒子の評価値を計算し、 $pbest$ と $lbest$ 及び $gbest$ を更新する。 $lbest$ が更新されると、上位層の粒子を更新する。

Step 3 : 速度更新

下位層の粒子は、式 (5.9)、上位層の粒子は、式 (5.11) により各粒子の速度を更新する。

Step 4 : 位置更新

式 (5.10) と (5.12) により、各粒子の位置を更新する。

Step 5 : 終了判定

最大探索回数に達するまで、Step2 からの処理を繰り返す。

5.3.2 H-GA-PSO アルゴリズム

H-GA-PSO アルゴリズムは、階層型構造の H-PSO 法 (図 5.8) を基に、早い収束速度を実現すると共に局所解問題を回避できるように、粒子の速度・位置更新式を改良し、更に初期粒子生成法と GA 演算による粒子の位置更新法を導入する。

A. 更新式の改良

H-PSO 法の収束時間が長い原因は、下位層の粒子が、全粒子の最良値の $gbest$ ではなく、グループの最良値 $lbest$ と $pbest$ を基に速度と位置を更新するためである。そこで、下位層の粒子の更新式に $gbest$ 項を追加して、次のように改良する。

(1) 下位層粒子の速度・位置更新式

$$\begin{aligned} v_{ij}^{itr+1} = & w_l \cdot v_{ij}^{itr} + c_{l1} \cdot rand() \cdot (pbest_{ij}^{itr} - x_{ij}^{itr}) \\ & + c_{l2} \cdot rand() \cdot (lbest_i^{itr} - x_{ij}^{itr}) \\ & + c_{l3} \cdot rand() \cdot (gbest^{itr} - x_{ij}^{itr}) \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$x_{ij}^{itr+1} = x_{ij}^{itr} + v_{ij}^{itr+1} \quad (5.12)$$

(2) 上位層粒子の速度・位置更新式

$$\begin{aligned} v_{ij}^{itr+1} = & w_h \cdot v_{ij}^{itr} + c_{h1} \cdot rand() \cdot (pbest_{ij}^{itr} - x_{ij}^{itr}) \\ & + c_{h2} \cdot rand() \cdot (gbest^{itr} - x_{ij}^{itr}) \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$x_{ij}^{itr+1} = x_{ij}^{itr} + v_{ij}^{itr+1} \quad (5.14)$$

i : 粒子の番号

j : グループの番号

itr : 探索回数

x : 粒子の位置

v : 粒子の速度

w_l : 下位層の速度に対する重み係数
 w_h : 上位層の速度に対する重み係数
 c_{l1} : 下位層の $pbest$ に対する重み係数
 c_{l2} : 下位層の $lbest$ に対する重み係数
 c_{l3} : 下位層の $gbest$ に対する重み係数
 c_{h1} : 上位層の $pbest$ に対する重み係数
 c_{h2} : 上位層の $gbest$ に対する重み係数
 $rand()$: 0~1 の一様乱数

ここで、各重み係数の設定においては、LDIWM と CFM から得た着想に基づき、上位層の粒子に対しては、自分自身の速度における係数を大きく設定することで多様な探索を実現し、下位層の粒子に対しては、各重み係数を小さく設定することで細かい探索を実現する。一方、 $gbest$ 項の係数 c_{l3} は、他の係数より小さく（ ≈ 0.5 倍）に設定することで、 $gbest$ に急速に集中することを回避する。

B. GA 演算による粒子位置の更新

更新式の改良により収束時間は短縮されるが、反面、下位層の粒子も $gbest$ を向けて移動するため局所解に陥る可能性が生じる。そこで、各粒子に多様性をもたせるために、Genetic Algorithm (GA) 演算を導入して粒子の位置を更新する。

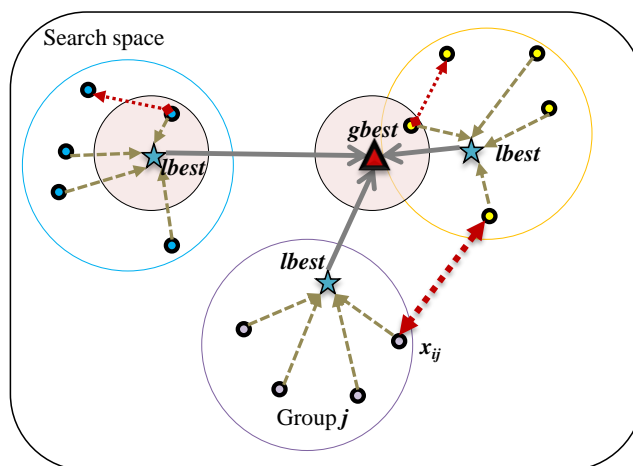


Fig.5.10 Genetic Algorithm (GA) updating of position of the particle

GA 演算による粒子位置更新法は、図 5.10 のように、グループ間の粒子を交換する交叉処理と、粒子の位置を *gbest*、或いは *lbest* 周辺以外の領域へ移動させる突然変異処理を施している。具体的な処理手順は次のようになり、そのフローを図 5.11 に示す。

Step 1 : 処理選択

(0,1) のランダム数と、設定値 p_0 及び p_1 との比較により、交叉、突然変異 1 と突然変異 2 の 3 つの処理から 1 つを選択する。ここで、粒子が徐々に最適位置に収束することを考慮すると、突然変異が交叉に比べてより多様な探索が実現できるため、交叉率と突然変異率の比率を 1 : 4 とし、更に、突然変異 1 と突然変異 2 の比率を 1 : 1 とする。

Step 2 : 交叉

生成されたグループの中から 2 つのグループと、そのグループの中から 1 つの粒子をランダムに選択して交換する。

Step 3 : 突然変異 1

ランダムに選択された粒子と *lbest* との距離がある設定値 L_b より小さい場合は、 L_b より大きくなるように突然変異させる。

Step 4 : 突然変異 2

ランダムに選択された粒子と *gbest* との距離がある設定値 L_b より小さい場合は、 L_b より大きくなるように突然変異させる。ここで、設定値 L_b は経験値とし、この設定値は探索空かのサイズによって異なる。

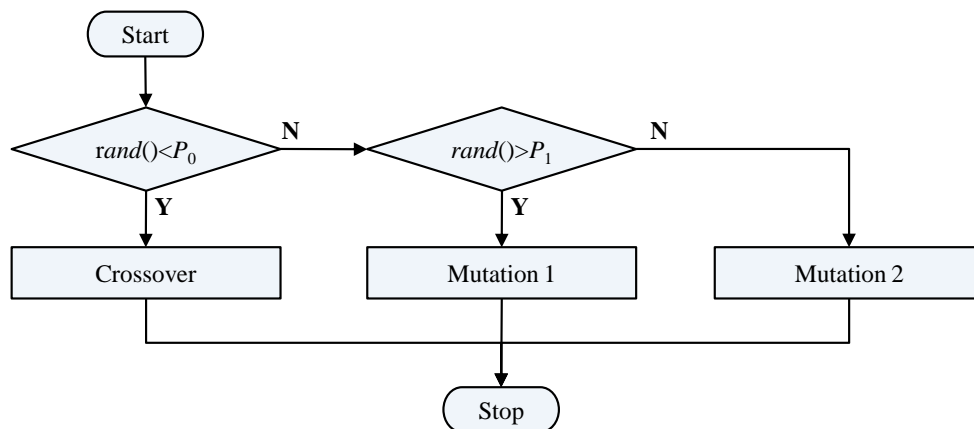


Fig.5.11 Procedure of GA updating of position of the particle

C. 初期粒子生成法

初期粒子が局所解付近に集中して生成された場合は、局所解に陥る可能性が高く、収束時間が長くなる可能性が高くなる。そこで、図 5.12 のように初期粒子が探索空間で一様に分布するように距離制限を導入し、初期粒子を生成する。

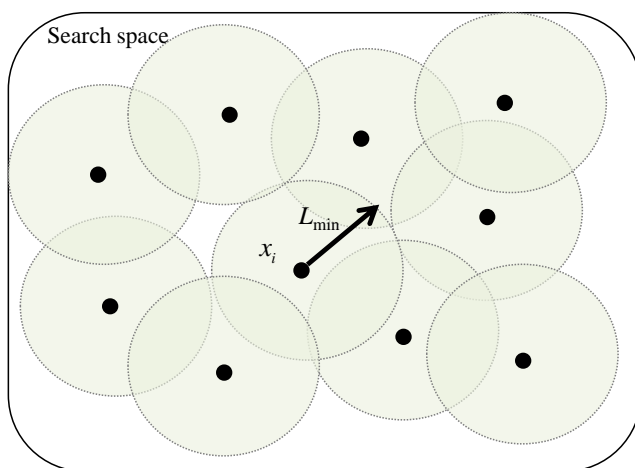


Fig.5.12 Concept of initialization

初期粒子生成法の処理手順（図 5.13）を、以下に示す。

Step 1 : 初期処理

最初の粒子 ($i=0$) をランダムに生成し、粒子の番号 $i=1$ とする。

Step 2 : 粒子生成

i 番目の粒子をランダムに生成する。

Step 3 : 距離チェック

Step2 により生成された i 番目の粒子と他の粒子との距離 (L) が、制限距離 L_{\min} より大きい場合は次の処理に続き、小さい場合は Step2 へ戻り粒子を再生成する。ここで、制限距離 L_{\min} をあまりにも大きくと設定すると、初期粒子の生成時間が長くなるため、シミュレーションに基づく経験値とし、この設定値は実際の探索空間によって異なる。

Step 4 : カウント

粒子番号を $i+1$ にする。

Step 5 : 分岐処理

i が設定された粒子サイズ (P_{size}) に達すると、次の処理に続き、達していない場合は

Step 2 の処理をする。

Step 5 : 終了

設定したグループ数により、ランダムに分けて、処理を終了する。

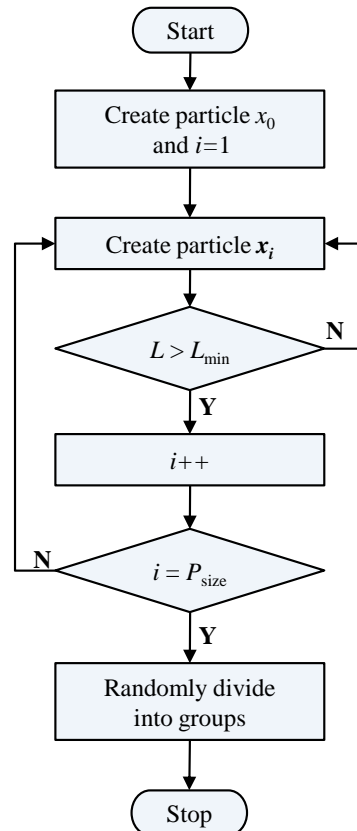


Fig.5.13 Procedure of initialization rule

5.3.3 H-GA-PSO アルゴリズムを用いた最適交通信号の探索

提案する H-GA-PSO アルゴリズムを用いて、多差路交差点における最適な交通信号を探索する。

A. 探索空間と粒子の定義

探索空間は、各信号現示の設定可能範囲によって構成される。探索空間の次元は、信号現示の種類によって異なる。例えば、信号現示の種類が 5 つの場合は、5 次元空間で探索することになる。群内の各粒子は、この探索空間を移動しながら、評価関数の式 (5.5) により、評価値が最小となるような最適解を探索する。

B. 探索手順

多差路交差点における交通渋滞最適化問題に対して、H-GA-PSO アルゴリズムを用いて最適交通信号を探索する処理過程は、次のようになり。そのフローを図 5.14 に示す。

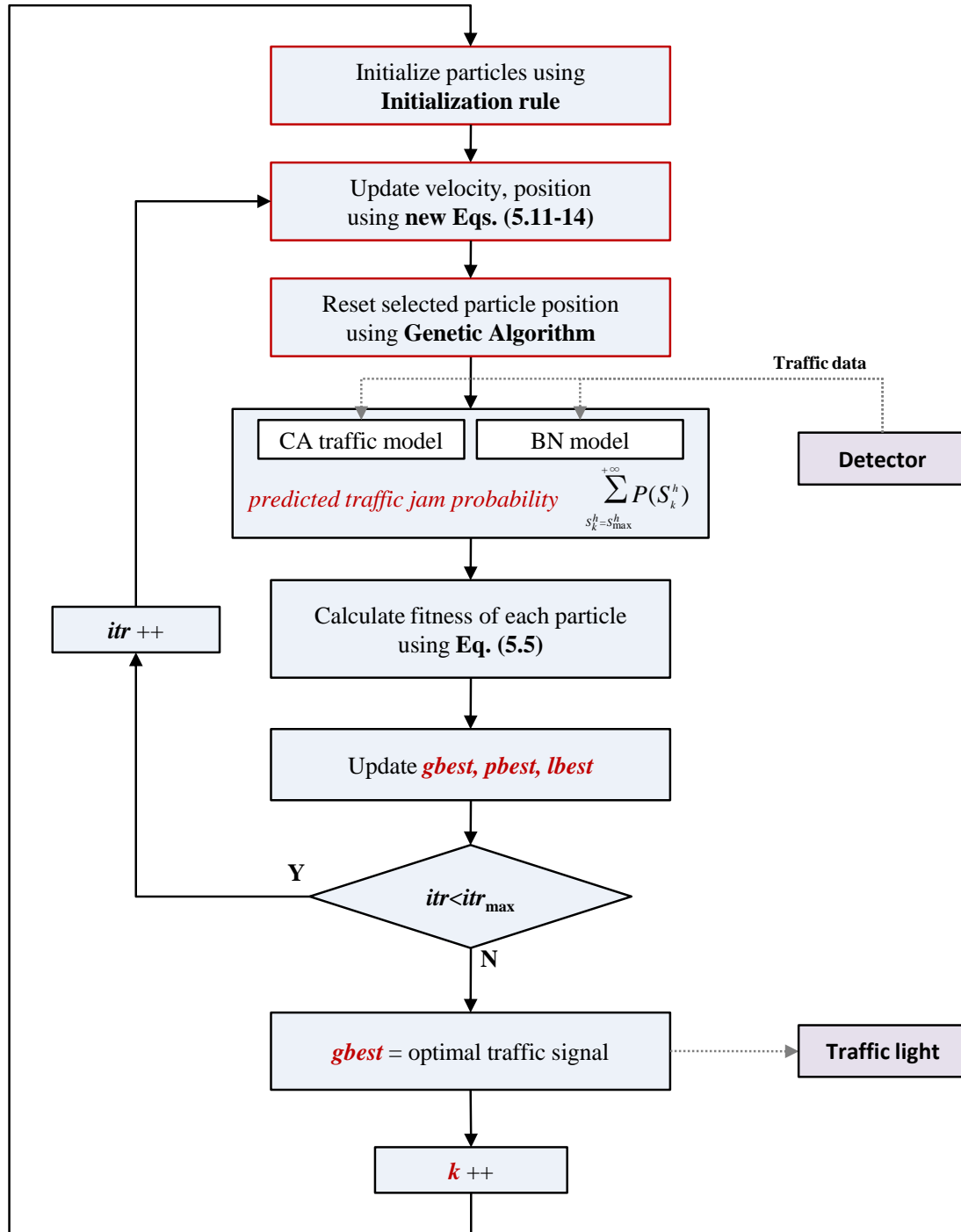


Fig.5.14 Procedure of traffic signal searching using H-GA-PSO algorithm

Step 1：初期化

初期粒子生成法により、初期粒子を生成する。

Step 2：粒子更新 1

改良更新式 (5.11) ～式 (5.14) を用いて各粒子の位置と速度を更新する。

Step 3：粒子更新 2

GA 演算の粒子位置更新法により、選択された粒子の位置を更新する。

Step 4：渋滞確率の算出

各粒子（異なる信号現示長）に対して、CA 交差点交通流モデルに基づき交通流入・流出量を推定し、事前確率分布を更新する。そして、BN モデルを用いて各道路での渋滞量確率分布を予測し、渋滞量確率を算出する。

Step 5：評価値の計算

各道路での渋滞量確率と式 (5.5) を用いて各粒子の評価値を計算する。

Step 6：ベスト値更新

各粒子の評価値により、 $pbest$ と $lbest$ 、及び $gbest$ を更新する。

Step 7：分岐処理

探索回数が最大探索回数以下の場合は Step 2 に戻り、最大探索回数に達したならば、次の処理をする。

Step 8：出力

$gbest$ を最適交通信号として出力し、次のサイクルの計算を開始する。

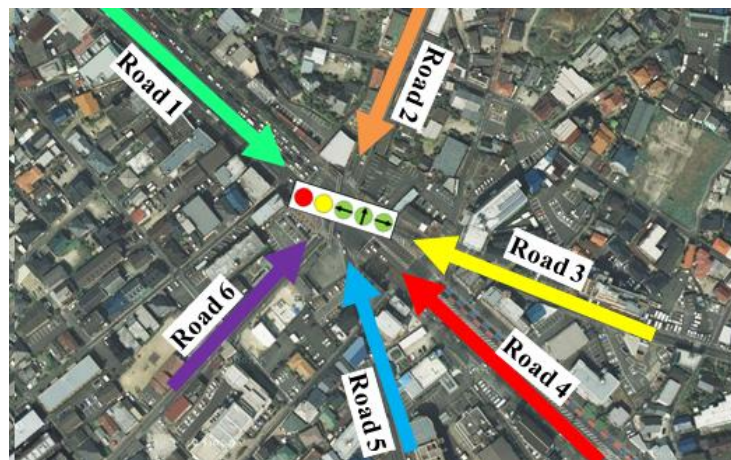
5.4 シミュレーション

提案する H-GA-PSO アルゴリズムと多差路交差点における実時間交通信号制御法の有効性を検討するため、実際の 6 差路交差点交通量を測定し、測定された交通データとマイクロシミュレータを用いて 3 種類のシミュレーションを行った。

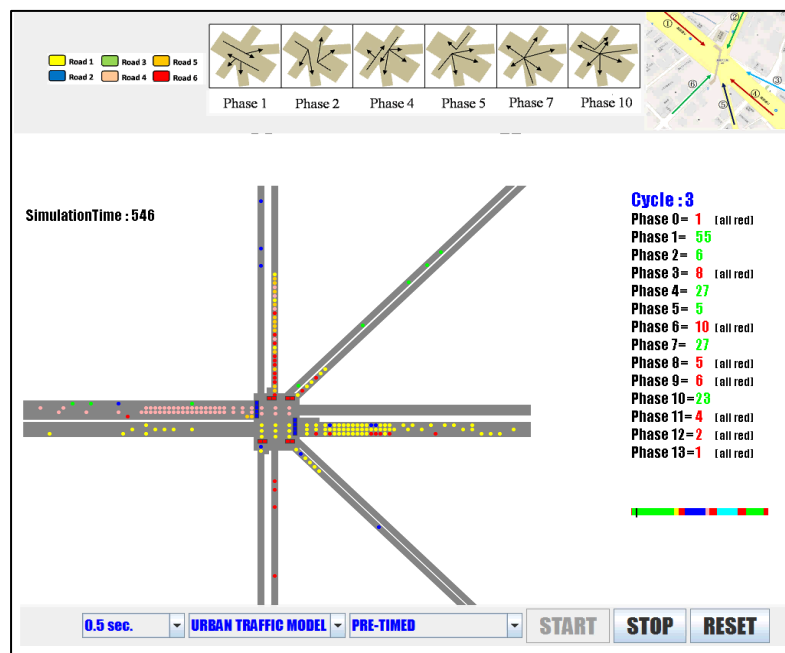
5.4.1 測定データとマイクロシミュレータの設定

シミュレーション対象エリアは福岡市南区井尻六つ角交差点で、図 5.15 (a) に地図、(b) にシミュレータ画面の一例を示す。交通量、及び信号現示の測定日時は、2010 年 9 月 15 日（水）の午前 7:30 から 8:30 ままで、この 6 差路交差点は定周期信号制御方式である。この 6 差路交差点信号機の定周期信号の現示長と、各現示の最小、最大時間限度を表 5.1 に示す。

このとき、実時間で交通信号を制御するためには、すべての計算処理が現示 1 の最小時間限度 $phase_{\min}^1 = 30$ [sec] 以内に終了する必要がある。各道路において測定され実データの一部を表 5.2 に示す。更に、測定データに基づき設定した交通マイクロシミュレータの車線数とセル数、及び交通量を表 5.3 に示す。また交通量は、最小値から最大値まで測定データの傾向に沿って流入率を設定する。表 5.4 に評価関数の重み係数と渋滞長を示す。重み係数はシミュレーションによる経験値で、渋滞長はセル数で表している。



(a) Map of Ijirimutsukado 6-way intersection



(b) Monitor of micro simulator

Fig.5.15 Ijirimutsukado 6-way intersection

Table 5.1 Traffic signal parameters

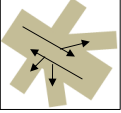
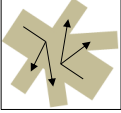
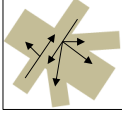
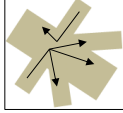
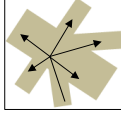
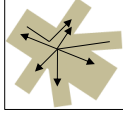
	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6
						
Time [sec]	55	8	27	8	27	23
Min [sec]	30	4	15	4	15	15
Max [sec]	80	12	35	12	35	35

Table 5.2 Actual traffic data

Cycle	Road 1						Road 2					
	In	Out					in	Out				
		2	3	4	5	6		3	4	5	6	1
1	18	5	19	21	6	0	15	0	0	6	3	1
2	14	3	17	28	4	0	8	0	0	4	5	2
...
20	45	6	27	35	6	0	17	0	1	5	6	1
21	58	5	22	27	5	0	13	0	0	5	4	2
ycle	Road 3						Road 4					
	In	Out					In	Out				
		4	5	6	1	2		5	6	1	2	3
1	17	0	0	0	12	1	71	0	2	48	2	0
2	13	0	0	0	9	2	46	0	3	51	2	0
...
20	11	0	0	0	12	0	72	0	3	57	4	0
21	15	0	0	0	9	2	66	0	2	68	2	0
cycle	Road 5						Road 6					
	In	Out					In	Out				
		6	1	2	3	4		1	2	3	4	5
1	10	0	3	5	0	0	8	1	6	1	0	0
2	13	0	7	6	0	0	1	0	7	0	0	0
...
20	11	0	0	0	12	0	9	0	4	1	0	0
21	15	0	0	0	9	2	6	3	4	1	1	0

Table 5.3 Parameters of simulator

Road number		1	2	3	4	5	6
Length [cell]		40	40	50	35	40	50
Lane number		4	2	1	4	1	2
Traffic flow [pcu/h]	Min	800	250	260	1200	150	120
	Max	1000	290	340	1400	170	140

Table 5.4 Parameters of fitness function

Road number	1	2	3	4	5	6
w^h	2	1.6	1.8	2.4	1.2	1.0
q^{\max} [cell]	20	25	30	25	25	30

5.4.2 従来法の設定

提案する H-GA-PSO アルゴリズムと多差路交差点における実時間交通信号制御の有効性を示すため、定周期制御と基本 PSO、H-PSO 及び Genetic Algorithm (GA) を用いて最適交通信号現示を探索した場合について比較検討する。

比較のために用いた LDIWM の更新式パラメータは、 $w_{\min} = 0.4$ 、 $w_{\max} = 0.9$ 、 $c_{l1} = c_{l2} = 2$ 、CFM の更新式パラメータは、 $\chi = 0.729$ 、 $c_1 = c_2 = 2.05$ 、H-PSO 法の更新式のパラメータは、 $w_h = 0.729$ 、 $w_l = 0.5$ 、 $c_{h1} = c_{h2} = 1.49$ 、 $c_{l1} = c_{l2} = 1.49$ 、また、H-GA-PSO アルゴリズムの更新式パラメータは、経験値として、 $w_h = 0.729$ 、 $w_l = 0.5$ 、 $c_{h1} = c_{h2} = 1.49$ 、 $c_{l1} = c_{l2} = 1$ 、 $c_{l3} = 0.5$ とし、粒子の位置更新法のパラメータは、 $p_0 = 0.2$ 、 $p_1 = 0.6$ 、 $L_{\min} = L_b = 10$ とする。GA において、染色体のエンコーディングと進化過程での選択処理などは、第 4 章と同じく設定する。定周期制御においては、実交差点の交通信号の制御パラメータをそのまま用いる。

5.4.3 シミュレーション 1 : H-GA-PSO アルゴリズムの検討

この 6 差路交差点における最適信号現示を探索するためには、適切な粒子数を決定する必要があるため、異なる粒子数とグループ数におけるシミュレーションを行なった。このシミュレーションでは同じ交通状況下で各 10 回ずつ行ったが、そのときのそれぞれの平均評価値と探索回数を表 5.5 に示す。

これより、この 6 差路交差点においては、粒子数が 20 個で 3 つのグループに分けた場合、平均評価値が最小になることを示している。また、現示 1 の最小時間限度 30 [sec] 以内の時間制限により、粒子数の増加に伴って探索回数は減少している。ここで粒子数が少ない場合、平均評価値は大きくなっているが、これは局所解に陥ったことによる。一方、粒子数が多い場合も平均評価値は大きくなっているが、これは、少ない探索回数のため最小値まで収束しないためである。

Table 5.5 Comparison of fitness for the different particle size

Particles Size \ Group number	2	3	4	Mean	Maximum iteration
10 (8-12)	1.271	1.246	1.219	1.245	52
15 (13-17)	1.221	1.247	1.238	1.235	35
20 (18-22)	1.221	1.205	1.239	1.222	26
25 (23-27)	1.211	1.212	1.264	1.229	21
30 (28-32)	1.229	1.248	1.243	1.243	17
35 (33-37)	1.232	1.281	1.29	1.268	15

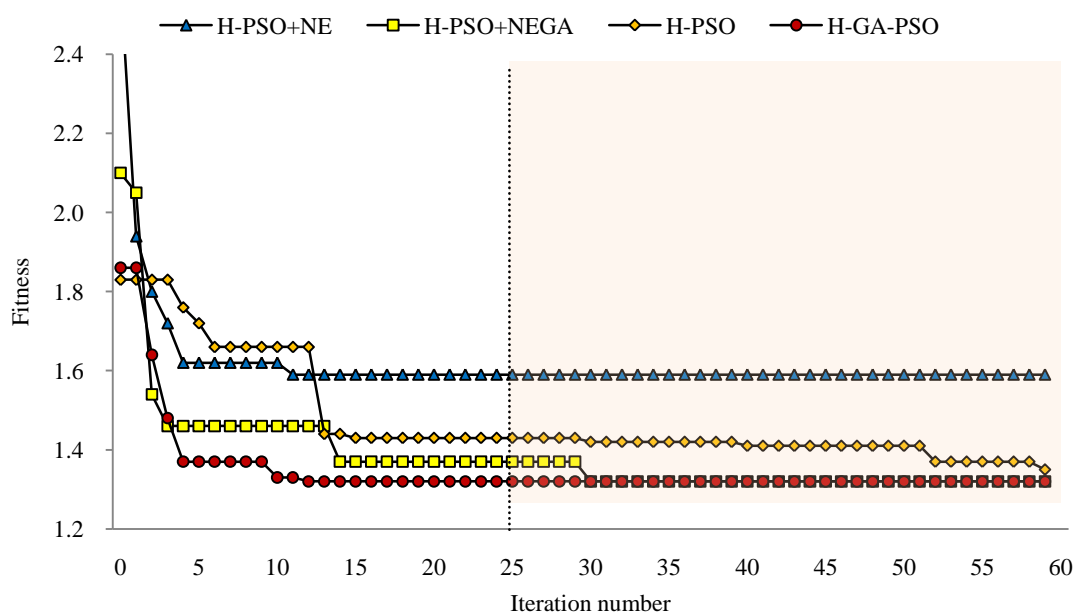


Fig.5.16 Fitness with generation of each method

次に、H-GA-PSO アルゴリズムにおける 3 つの改良部分の効果について検討する。ここでのシミュレーションは、H-PSO を基に更新式のみ改良した H-PSO+NE、GA 演算による粒子位置更新法を導入した H-PSO+NEGA、初期粒子更新法まで導入した H-GA-PSO アルゴリズム、それぞれによる探索を行った。シミュレーションは各 10 回ずつ行ったが、それぞれの平均評価値を表 5.6 に、また評価値の収束状況の一例として、探索回数が 60 回までの収束状況を図 5.16 に示す。

Table 5.6 Comparison of proposed PSO and H-PSO

Method	Mean fitness
H-PSO	1.3218
H-PSO+NE	1.3302
H-PSO+NEGA	1.3106
H-GA-PSO	1.3050

図 5.16 から分かるように、H-PSO による探索は、収束が遅く探索の許容回数 25 回以降に最小値に収束している。一方、表 5.6 から、H-PSO+NE による探索は、平均評価値が最大となっている。これは、図 5.16 のように、収束は速いが局所解に陥ったためである。H-PSO+NEGA による探索は局所解に陥ってないが、GA の導入により収束時間が長くなっている。これに対して、初期粒子生成法まで導入した H-GA-PSO アルゴリズムによる探索は、収束が速く、また局所解に陥っておらず、その平均評価値も最小（表 5.6）となっている。

5.4.4 シミュレーション 2 : H-GA-PSO と従来 PSO、GA との比較

従来の LDIWM と CFM、GA、及び H-GA-PSO アルゴリズムを用いた多差路交差点の最適交通信号の探索について検討する。探索条件に関するシミュレーション結果に基づき、粒子数 21 個、3 グループ、探索回数は 25 回とする。このシミュレーション 2 では、3 つの交通状況下（混雑程度：普通、高い、非常に高い）で各 20 回ずつ行ったが、それぞれの評価値を表 5.7 に、また一例として、道路混雑度が普通の場合の評価値の収束状況を図 5.17 に、更に道路混雑度が高い場合の平均評価値と標準偏差、及び best と worst の評価値を図 5.18 に示す。

Table 5.7 Fitness values for degree of traffic congestion

Method	Normal (Degree of traffic congestion)			
	Beat fitness	Worst fitness	Mean fitness	Standard deviation
GA	1.4873	1.8919	1.6380	0.1293
CFM	1.3813	1.5190	1.4081	0.0368
LDIWM	1.3813	1.7861	1.4675	0.1410
H-PSO	1.3661	1.7863	1.5180	0.1062
H-GA-PSO	1.3648	1.4046	1.3753	0.0110

Method	High (Degree of traffic congestion)			
	Beat fitness	Worst fitness	Mean fitness	Standard deviation
GA	2.4130	3.0009	2.5314	0.1546
CFM	2.3722	2.8030	2.4394	0.1307
LDIWM	2.3721	2.5890	2.4221	0.0633
H-PSO	2.3721	2.6230	2.4287	0.0610
H-GA-PSO	2.3720	2.4453	2.3866	0.0280

Method	Very high (Degree of traffic congestion)			
	Beat fitness	Worst fitness	Mean fitness	Standard deviation
GA	7.6192	7.9496	7.8066	0.0623
CFM	7.6099	7.7900	7.6882	0.0807
LDIWM	7.6099	7.7900	7.6948	0.0797
H-PSO	7.6099	7.7952	7.7136	0.0814
H-GA-PSO	7.6098	7.6713	7.6227	0.0244

図 5.17 で示されているように、LDIWM 法と CFM 法による探索は局所解に陥った可能性が高く、また H-PSO 法と GA 法による探索は、探索回数制限のため最小値まで収束していない。一方、表 5.7 は、提案する H-GA-PSO アルゴリズムによる探索は、従来の手法に比べ best 評価値はほぼ同じであるが、平均評価値は最小となっていることを示している。

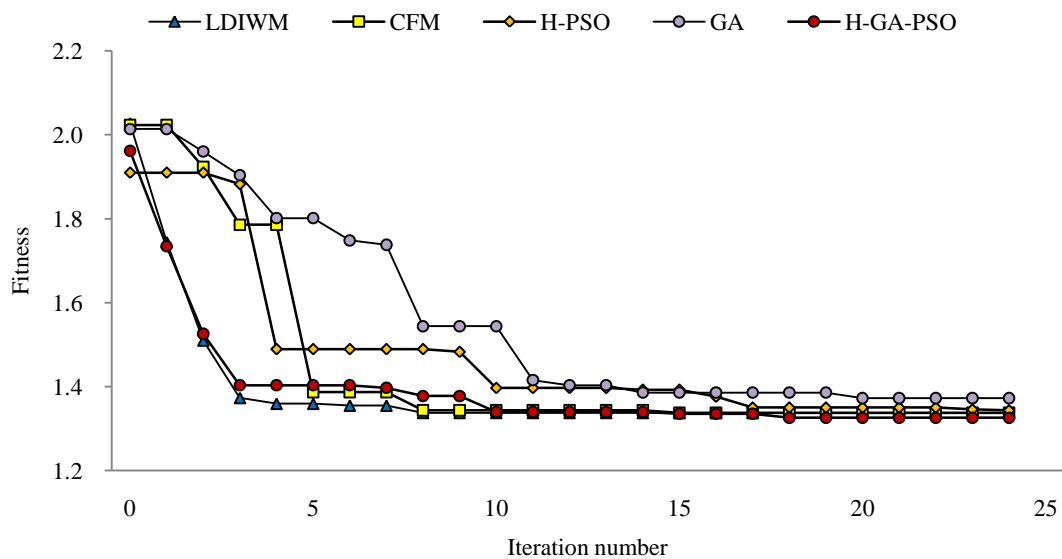


Fig.5.17 Fitness with generation of each method

また、20 回の平均評価値を基に示した標準偏差と worst 評価値の図 5.18 は、H-GA-PSO 提案法は worst 評価値が最小で、評価値の標準偏差が最も小さいことを示している。

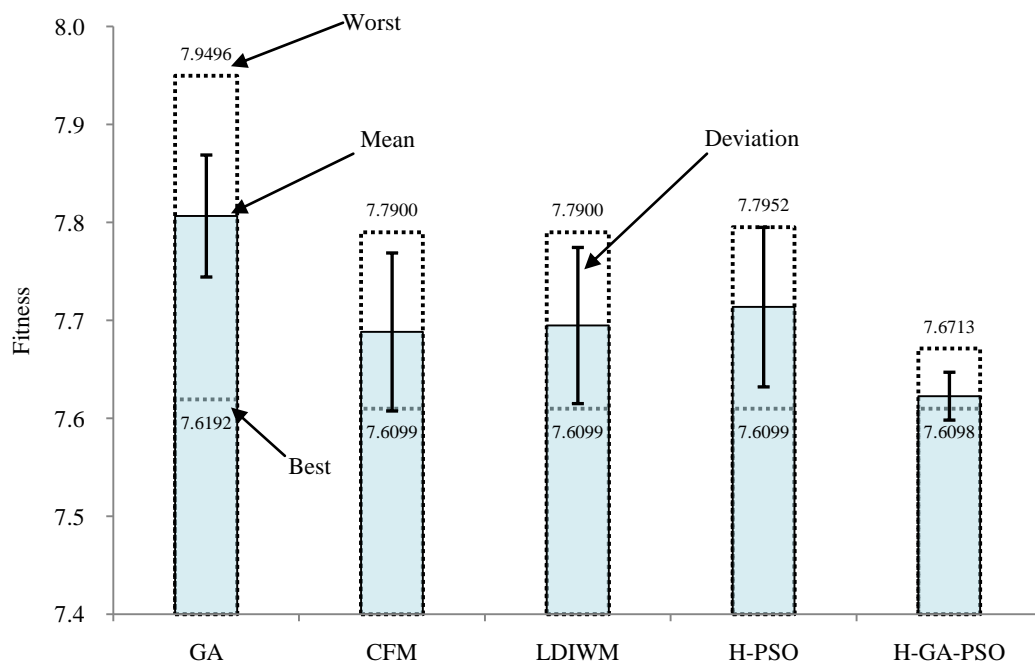


Fig.5.18 Mean fitness and standard deviation of each method

5.4.5 シミュレーション 3：従来の交通信号制御法との比較

提案する H-GA-PSO アルゴリズム、従来の LDIWM と CFM、及び GA を用いた交通信号の探索と定周期制御によるシミュレーションを平日早朝渋滞 2 時間ずつ 5 回実施した。このとき流入交通量のパターンは、各手法とも同じように設定する。

A. 渋滞確率分布の推移と探索過程

定周期制御と H-GA-PSO アルゴリズムを用いて制御したとき、2 [cycle] と 5 [cycle] 時の最適交通信号探索における、例として道路 1 での予測渋滞長確率分布を図 5.19 と図 5.20 に示し、各道路での予測渋滞長確率分布を付録 I に示す。2 [cycle] 時において、提案法により得られた交通信号時は、定周期信号時に比べ、混雑している道路 3 では渋滞確率が小さくなり、他の道路では同じレベルを維持していることを示している。一方、5 [cycle] 時には、主道路である道路 1 と道路 4、及び混雑している道路 2 での渋滞量確率が小さくなっている。

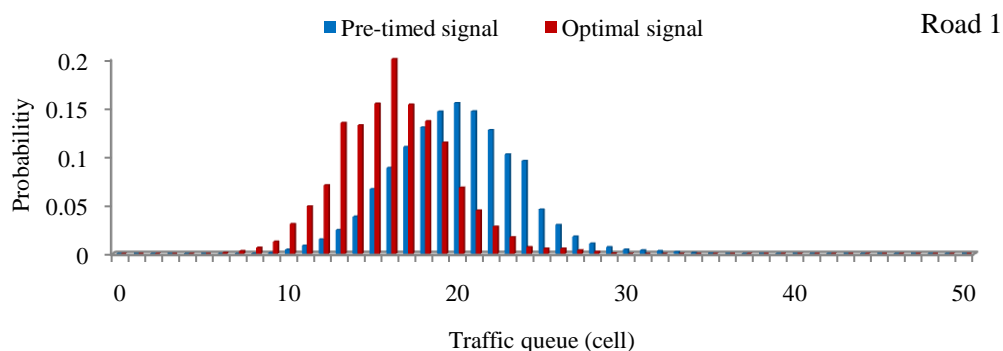


Fig.5.19 Probabilistic distribution of traffic queue from road 1 to road 6 at 2th cycle

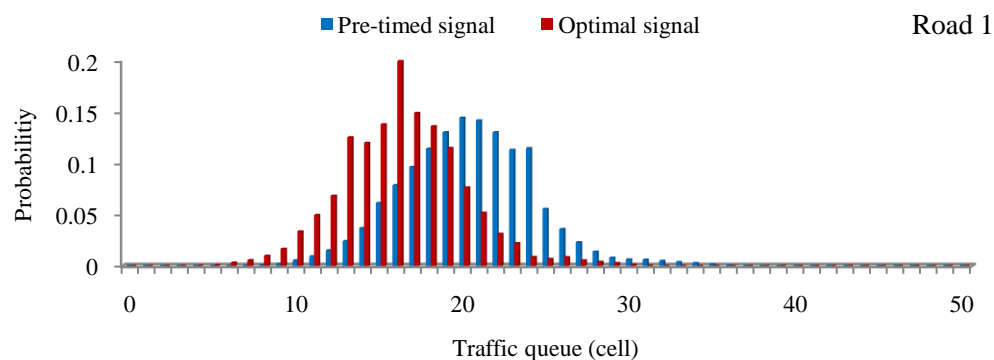


Fig.5.20 Probabilistic distribution of traffic queue from road 1 to road 6 at 5th cycle

このような各道路での渋滞量確率分布の算出のためには、渋滞量確率分布の予測が必要となるが、そのためには、交通流入・流出量の事前確率分布を計算する必要がある。一例として、2 [cycle] 時に提案法により得られた交通信号時の道路 1 における交通流入・流出量の事前確率分布を図 5.21 に示し、各道路における交通流入・流出量の事前確率分布は付録Ⅱに示す。

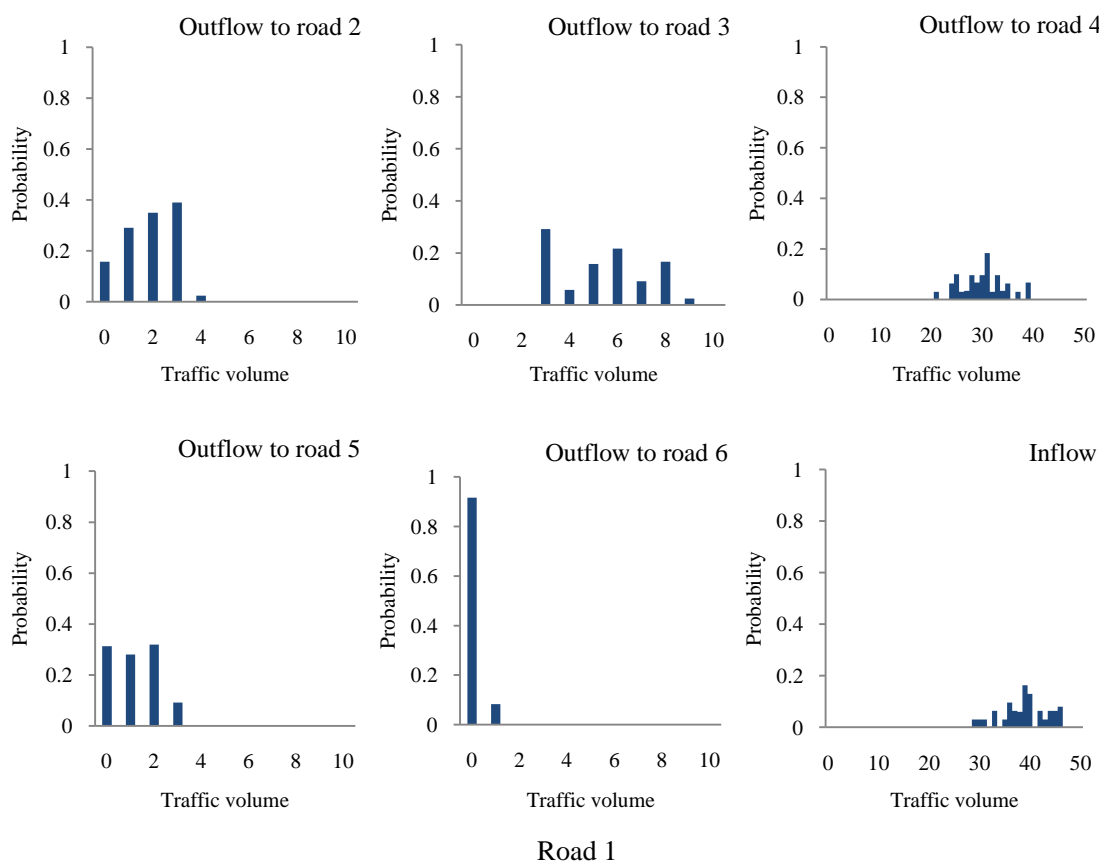


Fig.5.21 Priori probabilistic distributions of traffic inflow and outflow of each road at optimal signal

図 5.21 と付録Ⅱに示す各道路における交通流入・流出量の事前確率分布は、各道路における信号現示長とサイクル長によって異なる。一例として、定周期信号と提案法により得られた交通信号時の道路 1 における流出量（道路 2 と 3 へ）の事前確率分布の比較を図 5.22 に示し、各方向の流出量と流入量の事前確率分布の比較を付録Ⅲに示す。ここで、定周期信号の各信号現示長は表 5.1 であり、提案法により得られた各信号現示長は、現示 1 は 45 [sec]、現示 2 は 4 [sec]、現示 3 は 17 [sec]、現示 4 は 4 [sec]、現示 5 は 15 [sec]、現示 6 は 29 [sec] である。図 5.22 は、信号現示長の変更により、交通流入・流出の事前確率分布が更

新されていることを示す。以上のように、異なる粒子（信号現示）に対して、事前確率分布を更新ながら渋滞量確率分布を予測し、評価関数により計算した評価値を用いて粒子を評価する。

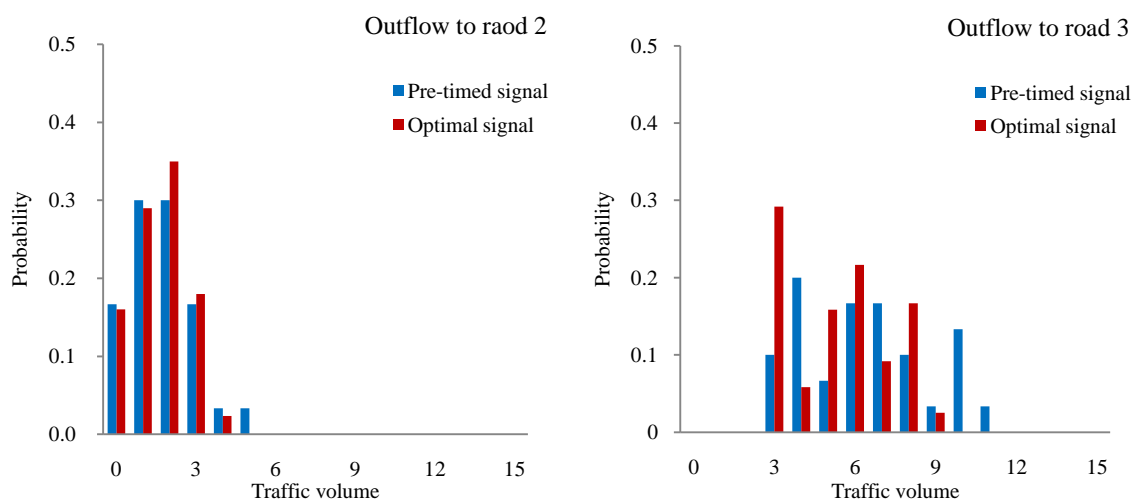


Fig.5.22 Prior probabilistic distribution of traffic inflow and outflows of road 1 at pre-timed signal and optimal signal

次に、2 [cycle] 時における最適な信号現示長の探索過程において信号現示 1 の変化を図 5.23 に、各信号現示の変化を付録IVに示す。ここでは、3つのグループの15個の粒子の中で、各グループ別に1個の粒子を選択して示している。また、6次元空間を6枚の図で示す。図 5.23 と付録IVは、各信号現示が、最適値に収束していることを示す。

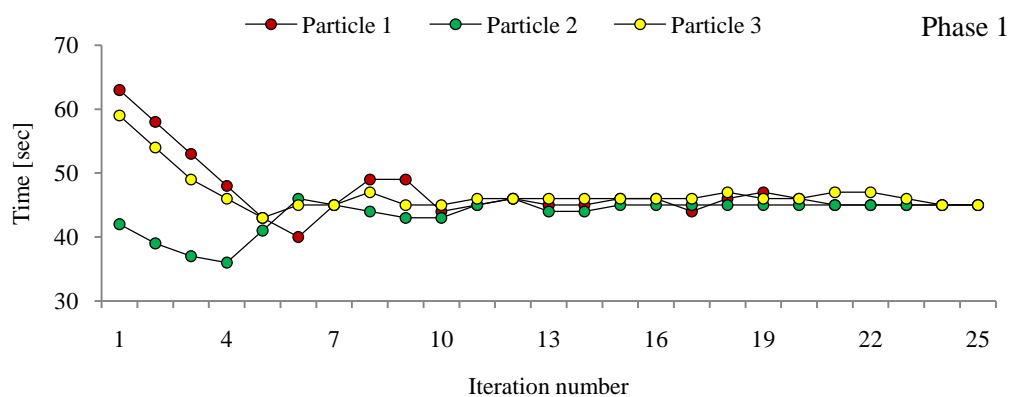


Fig.5.23 Position with generation

更に、この時の評価値の収束過程を図 5.24 に示す。各粒子は、最適値評価値 (*gbest*) に収束していることが確認できる。

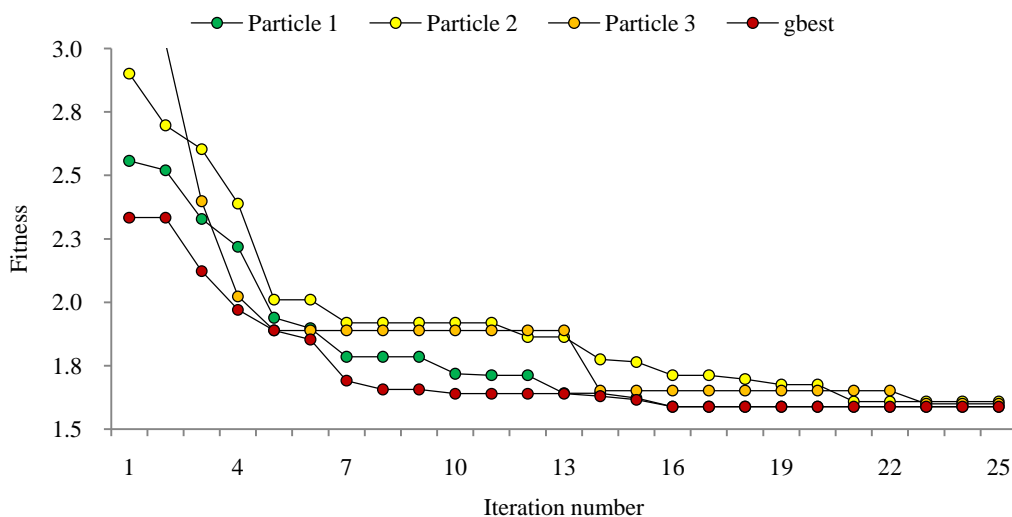


Fig.5.24 Fitness with generation

以上のように、毎サイクルの最適交通信号探索は、異なる粒子（各信号現示長）における交通流入・流出量の事前確率分布を更新し、渋滞量確率分布を予測する。更に、予測渋滞量確率分布に基づき、異なる粒子を評価しながら、最適な信号現示長 (*gbest*) を探索する。図 5.25 に、提案法により得られた各サイクルの最適信号現示を示す。この図から提案法は、交通量の変動に応じて、各信号現示長を制御していることが確認できる。

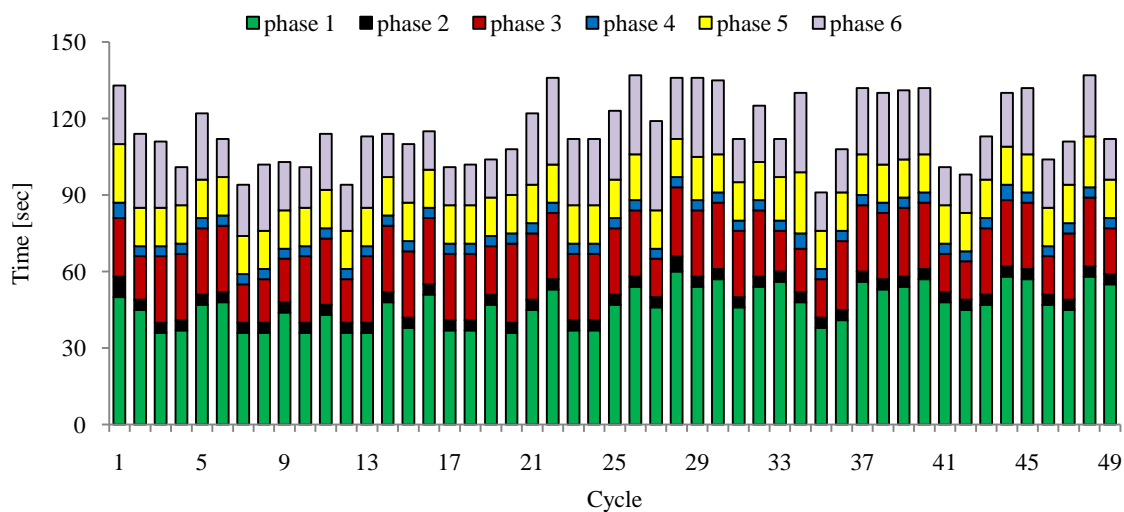


Fig.5.25 Traffic signal by proposed method using H-GA-PSO algorithm

B. 制御性能

定周期制御法と LDIWM、CFM、GA、及び H-GA-PSO アルゴリズムを用いて最適交通信号を探索したときの 5 日間の各道路での平均渋滞量、平均速度、及び平均遅れ時間を図 5.8 に、それぞれの日の結果を付録 V に示す。表 5.8 から分かるように、H-GA-PSO アルゴリズムを用いて最適交通信号を探索した場合、他の手法に比べて、主道路である道路 1 と道路 4、及び渋滞道路である道路 2 と道路 3 における渋滞長が最短で、交通量が少ない道路 5 と道路 6 でも、正常レベルを維持していることが分かる。更に、他の手法に比べて、総渋滞長は最短、平均速度は最大、平均遅れ時間は最小となっていることが分かる。一例として、平均速度と遅れ時間の変化過程を図 5.26 と 5.27 に示す。

Table 5.8 Performance Index of each traffic signal control method

Method	Queue length [m]							Mean speed [km/h]	Mean delay time[sec]
	road 1	road 2	road 3	road 4	road 5	road 6	Total		
Pre-timed	134.08	297.43	276.72	157.99	26.22	28.05	1029.03	12.78	30.2
GA	123.52	257.31	284.69	140.63	28.42	24.20	964.01	13.39	28.78
LDIWM	122.79	257.54	243.68	139.73	30.57	23.38	925.57	13.82	27.66
CFM	121.72	252.55	231.17	139.33	30.27	23.00	904.58	13.84	27.56
H-PSO	122.90	261.80	273.91	139.68	28.19	22.89	951.53	13.46	28.6
H-GA-PSO	120.23	223.99	228.49	137.34	33.28	22.23	876.95	14.23	26.56

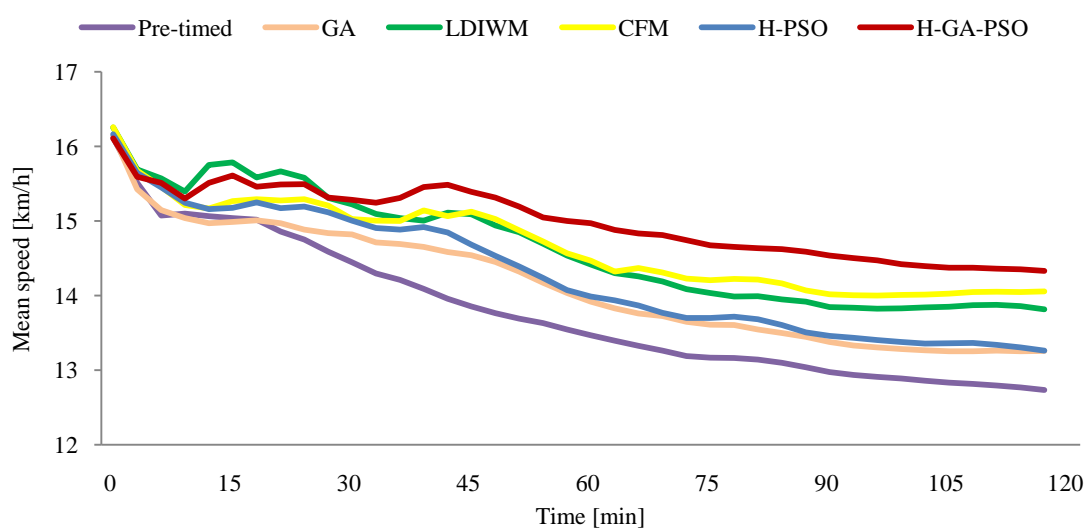


Fig.5.26 Mean speed of each method

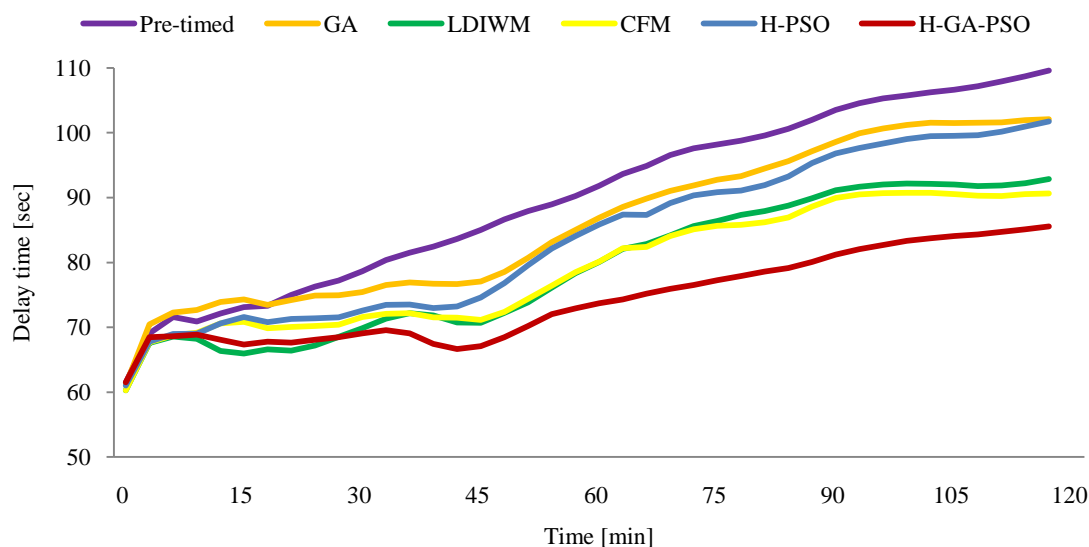


Fig.5.27 Delay time of each method

図 5.26 と 5.27 から、H-GA-PSO アルゴリズムを用いて最適交通信号を探索する時の平均速度は高いレベルを、平均遅れ時間は低いレベルを維持していることが分かる。また、道路 1 から道路 6 までの平均渋滞長を図 5.28 に示し、更に、総渋滞長、2 時間の平均総遅れ時間、車両 1 台当たりの平均速度、及びそれぞれ 5 回の標準偏差を図 5.29、図 5.30、図 5.31 に示す。

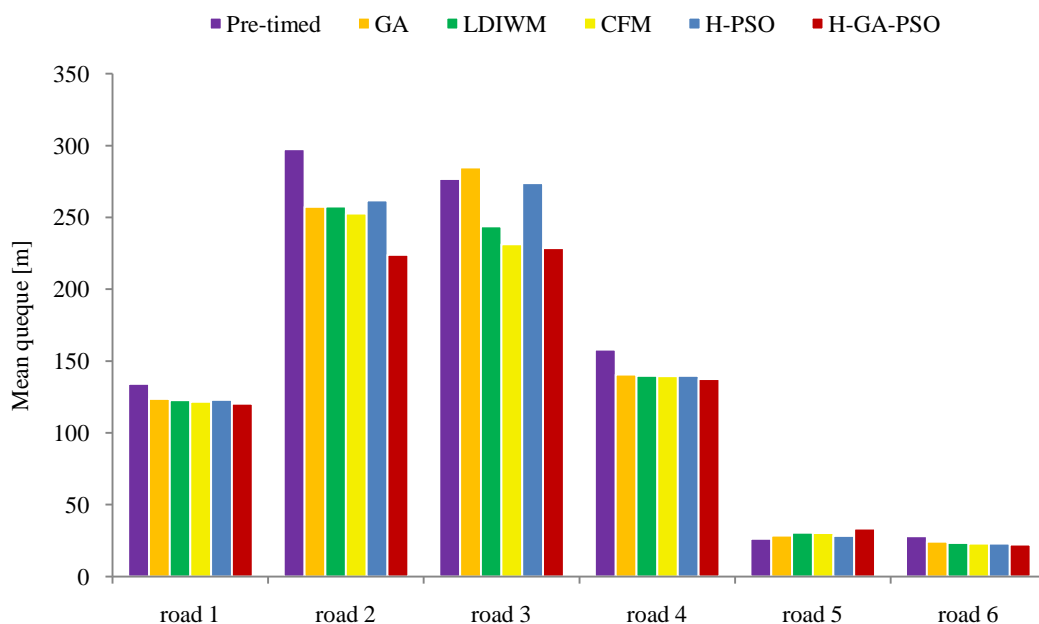


Fig.5.28 Comparison of mean traffic queue length of each road

図 5.28 から分かるように、H-GA-PSO アルゴリズムを用いた制御は、他の手法に比べ、渋滞道路である道路 2 と道路 3 での渋滞長は最小となり、交通量が多い主道路である道路 1 と道路 4 でも、渋滞長が最小となっている。道路 5 と道路 6 において、渋滞長が減少していない原因は交通量が少ないためで、これらの道路における青信号現示を短縮し、渋滞している道路での青信号現示を延長しているためである。

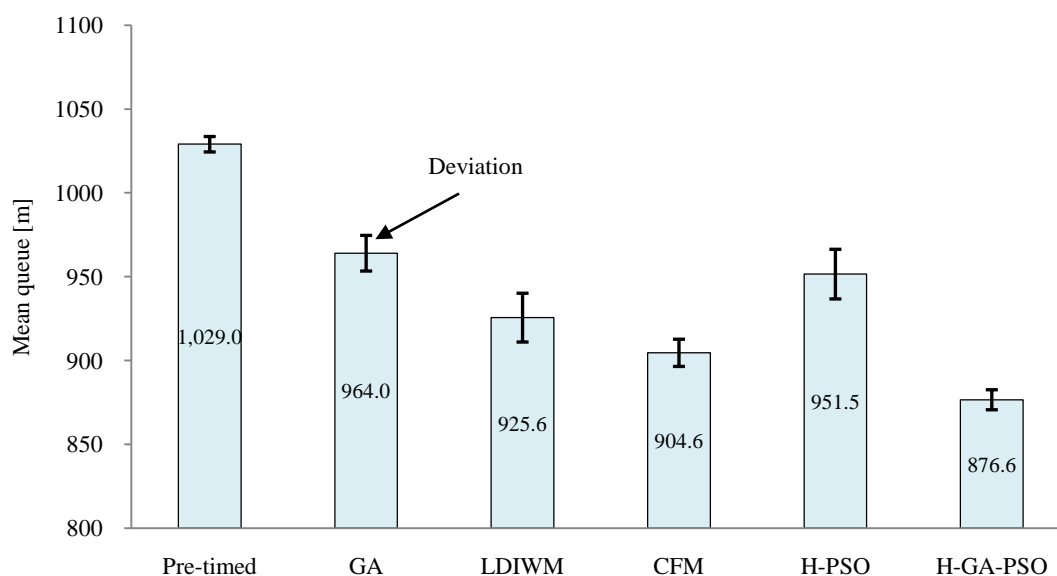


Fig.5.29 Comparison of mean traffic queue length (Total)

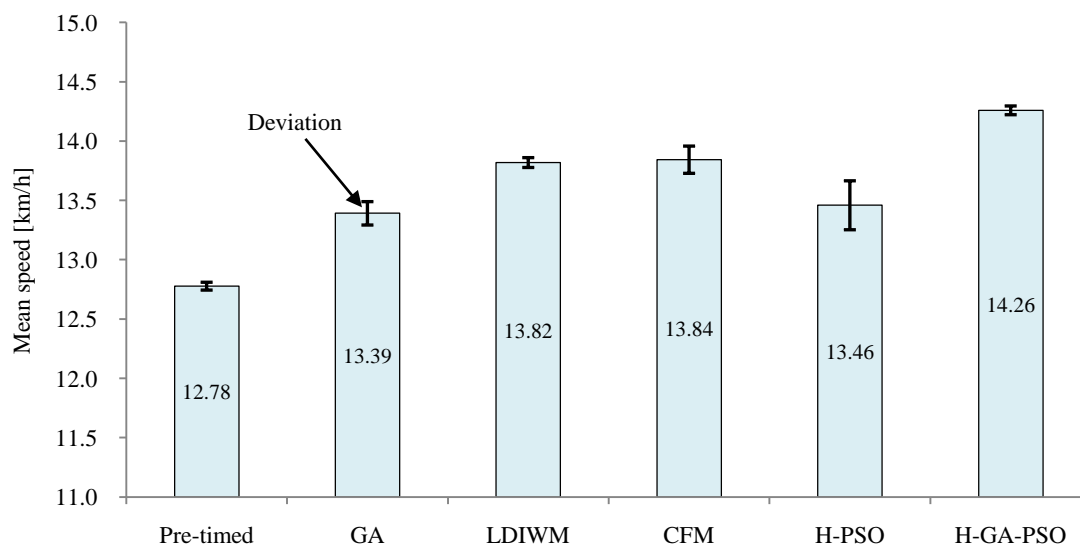


Fig.5.30 Comparison of mean speed

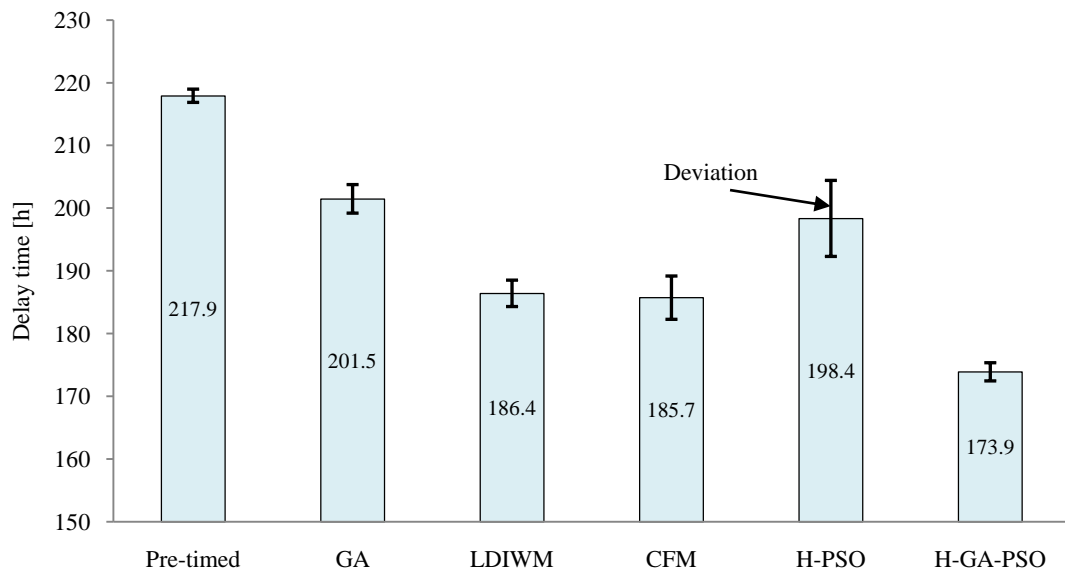


Fig.5.31 Comparison of total delay time

一方、図 5.29 の平均渋滞長に関しては、H-GA-PSO アルゴリズムを用いた交通信号制御は、定周期制御に比べて約 14.8 [%] 減少し、また、GA 法を用いた制御より 9.1 [%]、LDIWM 法を用いた制御より 5.3 [%]、CFM 法を用いた制御より 3.1 [%]、H-PSO 法を用いた制御より 7.9 [%] それぞれ減少している。図 5.30 の車両 1 台当たりの平均速度に関しては、H-GA-PSO アルゴリズムを用いた制御が、定周期制御、GA、LDIWM、CFM、H-PSO 法を用いた制御と比べて、それぞれ 1.48 [km/h]、0.87 [km/h]、0.44 [km/h]、0.42 [km/h]、0.8 [km/h] 速まっている。また、図 5.31 の総遅れ時間に関しては、H-GA-PSO アルゴリズムを用いた交通信号制御は、定周期制御、GA、LDIWM、CFM、H-PSO 法を用いた制御と比べて、それぞれ 20.2 [%]、13.7 [%]、6.7 [%]、6.3 [%]、12.3 [%] 減少している。更に、提案した H-GA-PSO アルゴリズムによる交通信号制御は、従来の方と比べて、各評価値の標準偏差が最も小さく、様々な渋滞状況においても、適切に交通信号を制御していることを示している。

5.5 まとめ

本章文では、多差路交差点交通信号の実時間確率的最適制御法を述べた。まず、交差点の道路において、交通流入・流出量、及び渋滞量を確率変数と見なし、これらの因果関係に基づき多差路交差点交通量 BN 確率モデルを構築した。次に、各道路での予測渋滞量確率分布

に基づき、多差路交差点における交通渋滞量確率分布最適化問題を定式化した。更に、実時間制御を実現するために、従来の **H-PSO** を基に粒子の更新式を改良し、初期粒子生成、及び **GA** 演算による粒子位置更新法を導入した **H-GA-PSO** アルゴリズムを提案した。最後に、福岡市南区井尻六つ角 6 差路交差点を対象とし、測定された実データとマイクロシミュレータを用いてシミュレーションを行い、**H-GA-PSO** アルゴリズムの有効性を示した。

第 6 章

結論

都心部での交通渋滞は、殆ど交差点部で発生し、交通事故の半数以上も交差点で発生しており間接的な交通渋滞の原因にもなっている。特に、交差する道路が多い多差路交差点では、交通量が多く信号現示が複雑で、渋滞が発生しやすく、交通渋滞のボトルネックになっていることが指摘されている。そこで、本論文は、十字路交差点のみならず、多差路交差点において、各道路での交通流入・流出量の不規則な変動を考慮し、渋滞量確率分布と交通信号現示の関係に基づき、交通渋滞量確率分布最適化ための実時間の確率的最適制御について明らかにした。

以下、本論文で得られた主な結果を挙げて結論する。

1) 渋滞量確率分布を予測するために、都心部交差点交通流の特徴を考慮したセル・オートマトン (CA) 交差点交通流モデルを提案し、推定交通量に基づき交通流入・流出量の事前確率分布を求めた。また、CA 交差点交通流モデルを用いてマイクロシミュレータを構築し、車両挙動、及び実データと推定値について比較検討した。その結果、CA 交差点交通流モデルは、実際の交通流の特徴を再現していることを確認し、CA 交差点交通流モデルによる交通量の推定も有効であることを示した。

2) 一般的な十字路交差点に対して交通渋滞量確率分布最適化問題を定式化し、Particle Swarm Optimization 法 (PSO) を用いて最適交通信号を探索する実時間での確率的最適制御法を提案した。また、実交通データとマイクロシミュレータを用いたシミュレーションにより、PSO による実時間内の制御が有効であることを示し、更に提案法は、従来の交通信号制御法に比べ、平均渋滞量、平均速度、遅れ時間の各評価指標において、有効であることを示した。

3) 多差路交差点交通量 Bayesian Network (BN) 確率モデルを構築し、多差路交差点における渋滞確率最適化問題を定式化した。更に、多差路交通信号の実時間制御を実現するため、H-GA-PSO アルゴリズムを提案した。また、実交通データとマイクロシミュレータを用いたシミュレーションにより、H-GA-PSO アルゴリズムによる交通信号の探索は、従来の手法に比べ、収束速度が速く、しかも局所解問題の回避も可能であることを示すと共に、従来の交通信号制御法より、平均渋滞長、平均速度、遅れ時間の評価指標において、有効であることを示した。

本研究で提案した交通信号の実時間確率的最適制御法は、十字路交差点のみならず多差路交差点まで考慮しているため、どのような交差点でも適用でき、更に、交通量の不規則変動を考慮しているので、交通パターンが変化してもパラメータを調整する必要がない利点がある。更に、CA 交差点交通流モデルを用いて構築したマイクロシミュレータは、他の交通信号制御法の有効性を検討するシミュレーション、及び交通量の推定などへも適用可能である。一方、実用化するためには、ハード系の設計と交通量計測機などのデータ送受信形式の決定などが必要となる。

参考文献

- [1] 交通工学 社団法人交通工学研究会, “改訂:「交通信号の手引き」”, 丸善(株), 2006.
- [2] F. V. Webster and B. M. Cobbe, Traffic Signals, “Road Research Technical Report 39”, Her Majesty’s Stationery Office (London), 1958.
- [3] Dennis I. Robertson and R. David Bretherton, “Optimizing Networks of Traffic Signals in Real Time The SCOOT Method”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.40, No.1, pp.11-15, 1991.
- [4] A. G. SIMS and K. W. DOBINSON, “The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) System Philosophy and Benefits”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.29, No.2, pp.130-137, 1980.
- [5] Gartner, N H, “OPAC: A DEMAND-RESPONSIVE STRATEGY FOR TRAFFIC SIGNAL CONTROL”, Transportation Research Record, Issue Number 906, pp.75-81 1983.
- [6] A. Kouvelas, K. Aboudolas, M. Papageorgiou and E. B. Kosmatopoulos, “A hybrid strategy for real-time traffic control of urban road networks”, IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, Vol.12, No.3, pp.884-894, 2011.
- [7] 織田 利彦, “交通流予測にもとづいた制御パラメータの逐次更新による信号制御”, 電気学会論文誌 D, Vol.125, No.5, pp.800-807, 2005.
- [8] 浅野美帆, 中島章, 堀口良太, 小根山裕之, 桑原雅夫, 越正毅, 赤羽弘和, “遅れ時間自己評価によるリアルタイム交通信号制御”, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, No.4, pp.879-886, 2003.
- [9] Zhong Qin, ZhiPing Fan, Xiaodong Zang, Huawei Gong, “Approach of Intersection Signal Control Based on PSO, Control and Decision Conference”, pp.4421-4425, 2009.
- [10] Junhua Wei, Anlin Wang, and Nianci Du, “Study of Self-Organizing Control of Traffic Signals in an Urban Network Based on Cellular Automata”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.54, No.2, pp.744-748, 2005.
- [11] LiGuo Zhang, YiYa Zhong, ZhenLong Li, YangZhou Chen, “PSO - Based Optimization for

- Isolated Intersections Signal Timings and Simulation”, Proceedings of the Seventh International Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp.993-996, 2008.
- [12] Y. Sazi Murat, Ergun Gedizlioglu, “A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions”, Transportation Research Part C, Vol.13, No.1, pp.19-36, 2005.
- [13] Y. J. Cao, N. Ireson, L. Bull and R. Miles, “Design of a Traffic Junction Controller Using Classifier System and Fuzzy Logic”, Proceedings of the 6th International Conference on Computational Intelligence (Theory and Applications: Fuzzy Days), pp.342-353, 1999.
- [14] Balaji Parasumanna Gokulan, Dipti Srinivasan, “Distributed Geometric Fuzzy Multiagent UrbanTraffic Signal Control”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 11, No. 3, pp.714-727, 2010.
- [15] Niittymäki J., Kononen V., “Traffic signal controller based on fuzzy logic”, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.5, pp.3578-3581, 2000.
- [16] Jian Qiao, Naiding Yang, and Jie Gao, “Two-Stage Fuzzy Logic Controller for Signalized Intersection”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - part A: Systems and Humans, Vol.41, No.1, pp.178-184, 2011.
- [17] Cheonshik Kim, YouSik Hong, “Traffic Signal Using Smart Agent System”, American Journal of Applied Sciences, Vol.5, No.11, pp.1487-1493, 2008.
- [18] Lilin Zang, Lei Jia, Yonggang Luo, “An Intelligent Control Method for Urban Traffic Signal Based on Fuzzy Neural Network”, Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp.3430-3434, 2006.
- [19] H. Adeli, A. Samant, “An Adaptive Conjugate Gradient Neural Network-Wavelet Model for Traffic Incident Detection”, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.15, No.4, pp.251-260, 2000.
- [20] KueiHsiang Chao, RenHao Lee, MengHui Wang, “An Intelligent Traffic Light Control Based on Extension Neural Network”, KES '08 Proceedings of the 12th international conference on Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, part1, pp.17-24, 2008.
- [21] Min Chee Choy, Dipti Srinivasan Ruey Long Cheu, “Neural Networks for Continuous Online Learning and Control”, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.17, No.6, pp.1511-1531,

2006.

- [22] Dipti Srinivasan, Min Chee Choy, Ruey Long Cheu, “Neural Networks for Real-Time Traffic Signal Control”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.7, No.3, pp.261-272, 2006.
- [23] Kaige Wen, Wugang Yang, Shiru Qu, “A stochastic adaptive traffic signal control model based on fuzzy reinforcement learning”, The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, Vol.5, pp.467-465, 2010.
- [24] Shoufeng Lu, Ximin Liu, Shiqiang Dai, “Adaptive and Coordinated Traffic Signal Control Based on Q-Learning and MULTIBAND Model”, IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, pp.765-770, 2008.
- [25] Ella Bingham, “Reinforcement learning in neurofuzzy traffic signal control”, European Journal of Operational Research, Vol.131, No.2, pp.232-241, 2001.
- [26] I. Arel, C. Liu, T. Urbanik, A.G. Kohls, “Reinforcement learning-based multi-agent system for network traffic signal control”, IET Intelligent Transportation System, Vol.4, No.2, pp.128-135, 2010.
- [27] P.G. Balaji, X. German, D. Srinivasan, “Urban traffic signal control using reinforcement learning agents”, IET Intelligent Transportation System, Vol.4, No.3, pp.177-188, 2010.
- [28] 申 芝仙, 崔 成優, 李 大弘, 李 義頡, “交通渋滞の確率モデルと交通信号制御”, 電気学会論文誌 C, Vol.131, No.2, pp.303-310, 2011.
- [29] X.-H. Yu, W.W. Recker, “Stochastic adaptive control model for traffic signal systems”, IET Intelligent Transportation System, Vol.4, No.3, pp.177-188, 2010.
- [30] ChengYou Cui, Jisun Shin, Heehyol Lee, “Real Time Traffic Signal Learning Control using BPNN based on Prediction for Probabilistic Distribution of Standing Vehicles”, Transportation Research Part C, Vol.14, No.4, pp.263-282, 2006.
- [31] 繁樹 算男, 本村 陽一, 植野 真臣, “ベイジアンネットワーク概説”, 培風館, 2006.
- [32] D. I. Robertson, “TRANSTY: a traffic network study tool”, RRI Report, LR 253, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1969.

- [33] Mauro V, Taranto C di, “UTOPIA”, Control, computers, communications in transportation, pp.245-252, 1990.
- [34] R.E. Neapolitan, “Learning Bayesian Networks”, Prentice Hall, 2003.
- [35] 陽一,岩崎 弘利,“ベイジアンネットワーク技術”, 東京電機大学出版局, 2006.
- [36] B. Chopard, M. Droz, “Cellular automata modeling of physical system”, United Kingdom at the University Press, Cambridge, 1998.
- [37] Wolfram S, “Theory and Applications of Cellular Automata”, World Scientific, 1986.
- [38] 金井政宏, 西成活裕, 時弘哲治, “交通流の確率モデルについて”, 応用力学研究所研究集会報告, No.16ME-S1, 2004.
- [39] M. Fukui, Y. Ishibashi, “Traffic Flows in 1D Cellular Automaton Model Including Cars Moving with High Speed”, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.56, No.6, pp.1868-1870, 1996.
- [40] M. Takayasu and H. Takayasu, “1/f-noise in a traffic model”, Fractals, Vol.1, No.4, pp.860-866, 1993.
- [41] Nishinari K and Takahashi D, “Multi-value cellular automaton models and metastable states in a congested phase”, Journal of Physics A: Mathematical and General, Vol.33, No.43, pp.7709-7720, 2000.
- [42] K. Nagel, M. Schreckenberg, “A Cellular automaton model for freeway traffic”, Journal de Physique I, Vol.2, No.12, pp.1868-1870, 1996.
- [43] J. Kennedy, R. Eberhart, “Particle Swarm Optimization”, Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks, pp.1984-1948, 1995.
- [44] Y. Shi, R. Eberhart, “A modified particles swarm optimizer”, Proceedings of the IEEE World Congress on Computational Intelligence, pp.69-73, 1998.
- [45] M. Clerc, J. Kennedy, “The particle swarm—Explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.6, No.1, pp.58-73, 2002.

- [46] Janson S., Middendorf M., “A hierarchical particle swarm optimizer and its adaptive variant”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.35, No.6, pp.1272-1282, 2005.
- [47] ChuanJi Fu, BingHong Wang, ChuanYang Yin, Tao Zhou,Bo Hu, Kun Gao, P.M. Hui, ChinKun Hu, “Analytical studies on a modified Nagel-Schreckenberg model with the Fukui-Ishibashi acceleration rule”, Chaos, Solitons and Fractals, Vol.31, No.3, pp.772-776, 2007.
- [48] A Schadschneider, M. Schreckenberg, “Cellular automaton models and traffic flow”, Journal of Physics A: Mathematical and General, Vol.26, pp.679-683, 1993.
- [49] S. Krauss, P. Wagner, C. Gawron, “Continuous limit of the Nagel-Schreckenberg model”, Physical Review E, Vol.54, No.4, pp.3707-3712, 1996.
- [50] M. Schreckenberg, A. Schadschneider, K. Nagel,N. Ito, “Discrete stochastic models for traffic Flow”, Physical Review E, Vol.51, No.4, pp.2939-2949, 1995.
- [51] B. S. Kerner, H. Rehborn, “Experimental properties of complexity in traffic flow”, Physical Review E, Vol.53, No.5, pp.4275-4278, 1996.
- [52] S. Krauss, P. Wagner, “Metastable states in a microscopic model of traffic flow”, Physical Review E, Vol.55, No.5, pp.5597-5602, 1997.
- [53] V. Miranda, Hrvoje Keko, Alvaro Jaramillo, “EPSO: Evolutionary Particle Swarms”, Studies in Computational Intelligence, Vol.66, pp.139-167, 2007.
- [54] R. Eberhart,Y. Shi, “Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources”, Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, Vol.1, pp.81-86, 2001.
- [55] 伊庭 斉志, “遺伝的アルゴリズムの基礎—GA の謎を解く”, オーム社, 1994.
- [56] Javier J.SM, Manuel J.GM, Enrique RR, “Traffic Signal Optimization in”La Almozara” District in Saragossa Under Congestion Conditions, Using Genetic Algorithms, Traffic Micro simulation, and Cluster Computing”, IEEE Transactions on intelligent Transportation System, Vol.11, No.1, pp.132-141, 2010.
- [57] Pedro Fernandes, Urbano Nunes, “Platooning of Autonomous Vehicles with Intervehicle Communications in SUMO Traffic Simulator”, 13-th International IEEE Annual Conference

on Intelligent Transportation Systems, pp.1313-1318, 2010.

- [58] Michał MACIEJEWSKI, “A comparison of microscopic traffic flow simulation systems for an urban area”, *Transport Problems: an International Scientific Journal*, Vol.5, No.4, pp.27-38, 2010.
- [59] M. Matsumoto, T. Nishimura, “Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator”; *ACM Transaction on Modeling and Computer Simulations*, Vol.8, No.1, 1998.

謝辞

本研究を進めてあたり、始終、御指導と御支援を賜りました指導教授である李義頡先生に心より深謝いたします。李義頡教授からは、学業だけではなく、日常生活の悩みや卒業後の進路などについても、いろいろなアドバイスを頂きました。

学位論文審査において、貴重な御意見と御助言を賜りました早稲田大学大学院情報生産システム研究科の村田智洋教授と大貝晴俊教授に感謝いたします。

また、多くの御指摘や御協力を下さいました李研究室の先輩・同期・後輩の皆様に感謝いたします。特に、本研究における交差点交通量は、皆さんが御協力して下さったからこそ、実測できました。

更に、日本学生支援機構からの「私費外国人留学生学習奨励費」、早稲田大学からの「博士後期課程若手研究者養成奨学金」と「授業料減免奨学金」、アンビエント SOC 教育研究の国際拠点プログラムからの支援補助により、研究に集中することができました。すべての関係者に感謝します。

最後に、これまでの研究生活を支え支援してくださった父崔一松と母蔡桂春、及び妻任紅梅に深く感謝します。

研究業績

1. 学術誌原著論文

1. 崔 成優, 韓 建榮, 宮崎道雄, 李 義頡, “階層型 H-GA-PSO 法を用いた多 差路交差点渋滞確率最適化によるリアルタイム交通信号制御”, 電気学会論文誌 C, Vol.132, No.12, pp.1982-1991, 2012 年 12 月.
2. 崔 成優, 申 芝仙, 宮崎道雄, 李 義頡, “交通渋滞確率最適化のためのリアルタイム交通信号制御”, 電気学会論文誌 C, Vol.132, No.1, pp.21-31, 2012 年 1 月.
3. Chengyou Cui, Mizuki Takamura, Heehyol Lee, “Traffic signal control for a multi - forked road”, Journal of Artificial Life and Robotics, Vol.16, No.2, pp.253-257, September 2011.
4. 申 芝仙, 崔 成優, 李 大弘, 李 義頡, “交通渋滞の確率モデルと交通信号制御”, 電気学会論文誌 C, Vol.131, No.2, pp.303-310, 2011 年 2 月.
5. Satomi Shikasho, KunYoung Han, JiSun Shin, ChengYou Cui, HeeHyol Lee, “A Learning Control of Unused Energy Power Generation”, Journal of Artificial Life and Robotics, Vol.15 , No.4, pp.450-454, December 2010.
6. Chengyou Cui, Jisun Shin, Heehyol Lee, “Real-time traffic signal learning control using BPNN based on predictions of the probabilistic distribution of standing vehicles”, Journal of Artificial Life and Robotics, Vol.15, No.1, pp.58-61, August 2010.
7. Cheng-You Cui, Ji-Sun Shin, Fumihiro Shoji, Hee-Hyol Lee, “Traffic signal control based on a predicted traffic jam distribution”, Journal of Artificial Life and Robotics, Vol.14 , No.2, pp.134-137, November 2009.

2. 国際会議・シンポジウム

1. ChengYou Cui, HeeHyol Lee, “Real-Time Traffic Signal Control of Multi-Way Intersection based on Prediction of Traffic-Jam Probability”, Proceedings of the International Conference on Humanized Systems 2012 (Korea), pp.371-375, August 2012.
2. ChengYou Cui, HeeHyol Lee, “Distributed Traffic Signal Control using PSO based on Probability Model for Traffic Jam”, Proceedings of the 12th International Conference IAS-12 (Korea), Vol. 1, pp.629-639, June 2012.

3. Chengyou Cui, Mizuki Takamura, Heehyol Lee, “Traffic Signal Control of Multi - Forked Road”, Proceedings of The Sixteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics (Japan), pp.503-506, January 2011.
4. Chengyou Cui, Jisun Shin, Heehyol Lee, “Real Time Traffic Signal Learning Control using BPNN based on Prediction for Probabilistic Distribution of Standing Vehicles”, Proceedings of The Fifteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics (Japan), pp. 569-572, February 2010.
5. Satomi Shikasho, JiSun Shin, ChengYou Cui, HeeHyol Lee, “A Learning Control of Unused Energy Power Generation”, Proceedings of The Fifteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics (Japan), Vol.15 , No.4, pp. 1029-1032, February 2010.
6. ChengYou Cui, Jisun Shin, Michio Miyazaki, Heehyol Lee, “Traffic Signal Control Using Predicted Distribution of Traffic Jam”, The International Conference on Electrical Engineering (China), July 2009.
7. ChengYou Cui, Jisun Shin, Fumihiro Shoji, Heehyol Lee, “Traffic Signal Control based on a predicted traffic jam distribution”, Proceedings of The Fourteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics (Japan), pp.55-58, February 2009.
8. Cui-Chengyou, Lee-Taehong, Shin-Jisun, Miyazaki-Michio, Lee-Heehyol, “Dynamic Bayesian Network Model of Traffic Jam and Traffic Signal Control”, The 40th ISCIE international Symposium on Stochastic System Theory and Applications (Japan), November 2008.

3. 国内学会・シンポジウム

1. 崔 成優, 李 大弘, 申 芝仙, 金 鎮一, 宮崎道雄, 李 義頡, “交通渋滞予測分布に基づく交通信号制御”, 平成 20 年電気学会電子・情報・システム部門大会 (函館) 講演論文集, pp.572-573, 2008 年 8 月.
2. 崔 成優, 申 芝仙, 宮崎道雄, 李 義頡, “停車台数予測分布に基づく交通信号制御”, 平成 21 年電気学会全国大会 (札幌) 講演論文集, No.4, pp.401, 2009 年 3 月.
3. 崔 成優, 申 芝仙, 高村水碧, 宮崎道雄, 李 義頡, “交通シミュレータの流出交通量確率分布推定に基づく交通信号制御”, 平成 22 年電気学会電子・情報・システム部門大会 (熊本) 講演論文集, pp.839-843, 2010 年 9 月.

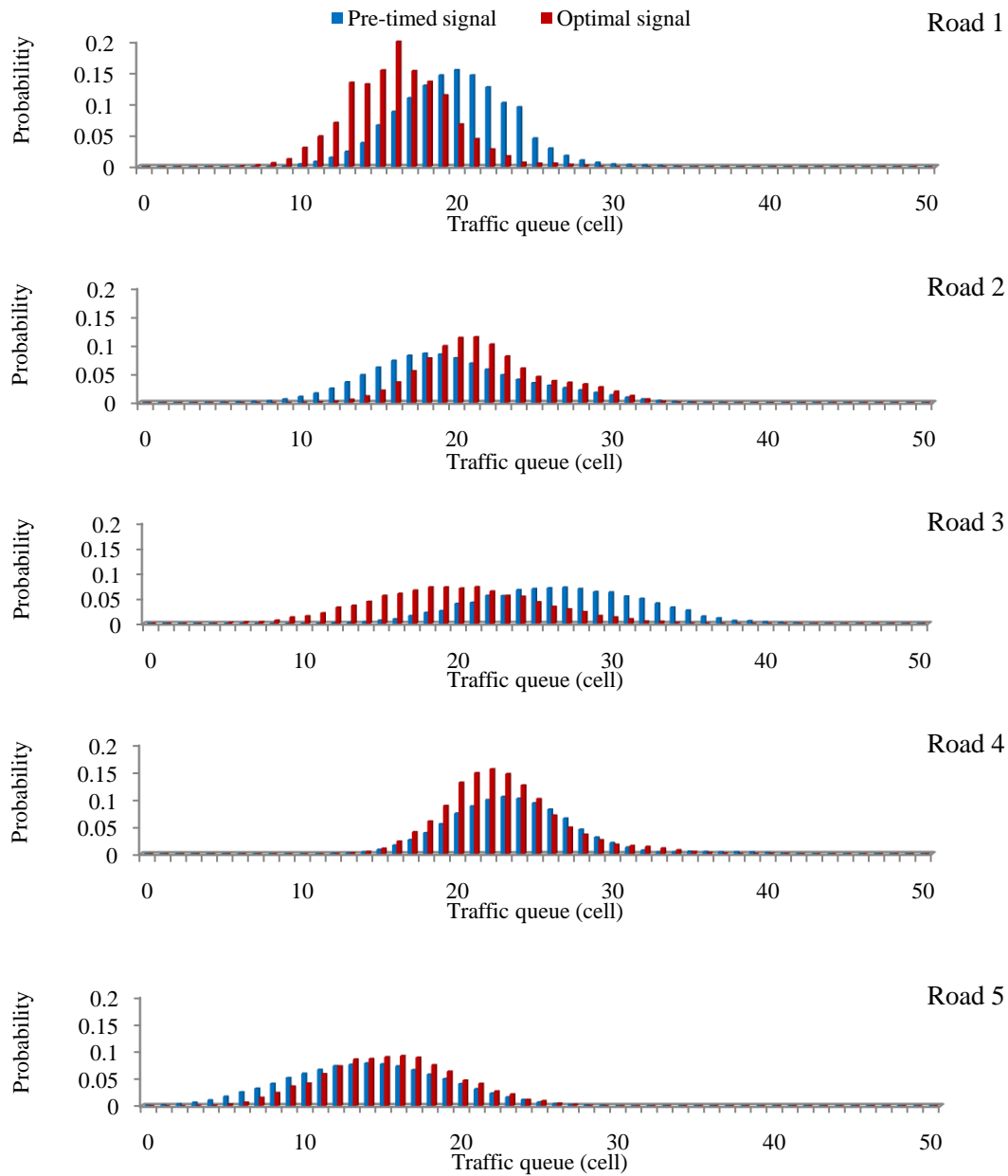
4. 受賞

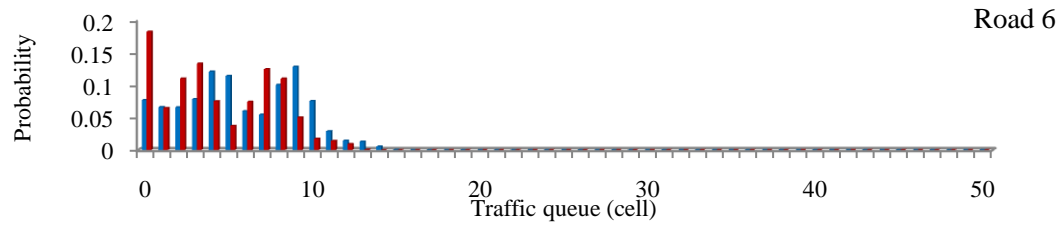
1. Excellent Paper Award, “Real-Time Traffic Signal Control of Multi-Way Intersection Based on Predicted Probabilistic Distribution of Traffic Jam”, 6-th IPS International Collaboration Symposium, November 2012.
2. Young Author Award, “Real Time Traffic Signal Learning Control using BPNN based on Prediction for Probabilistic Distribution of Standing Vehicles”, The Fifteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics, February 2010.

付録

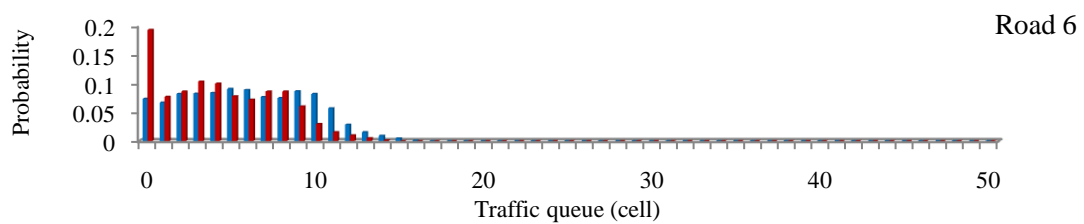
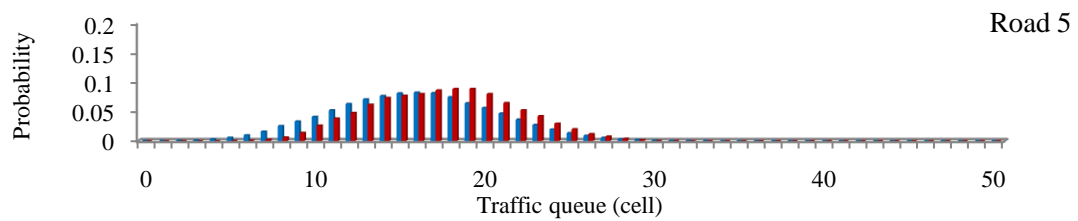
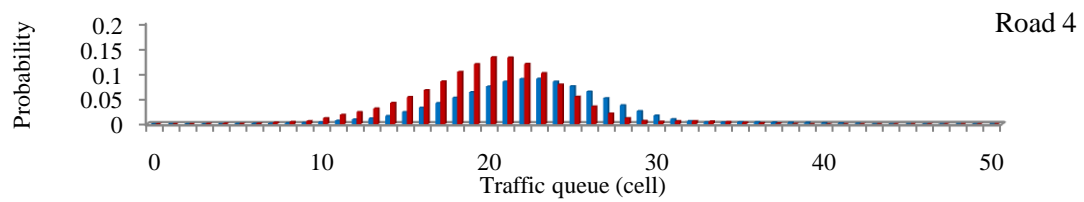
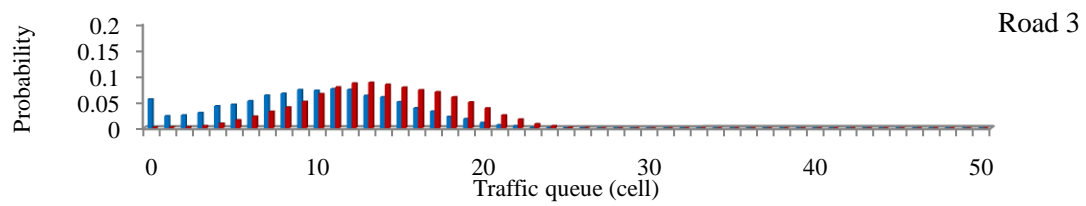
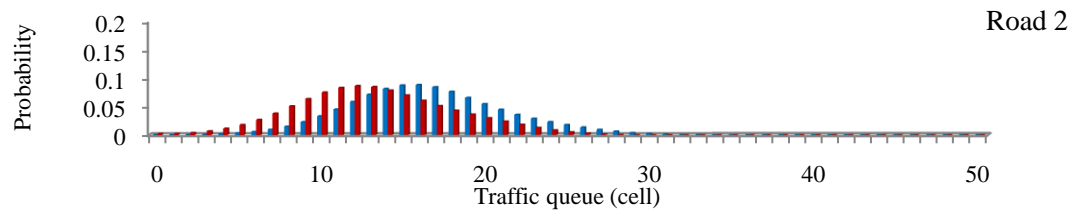
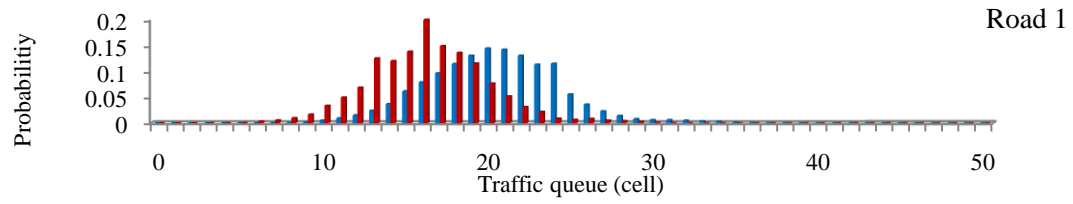
I . Probabilistic distribution of traffic queue from road 1 to road 6

① 2th cycle

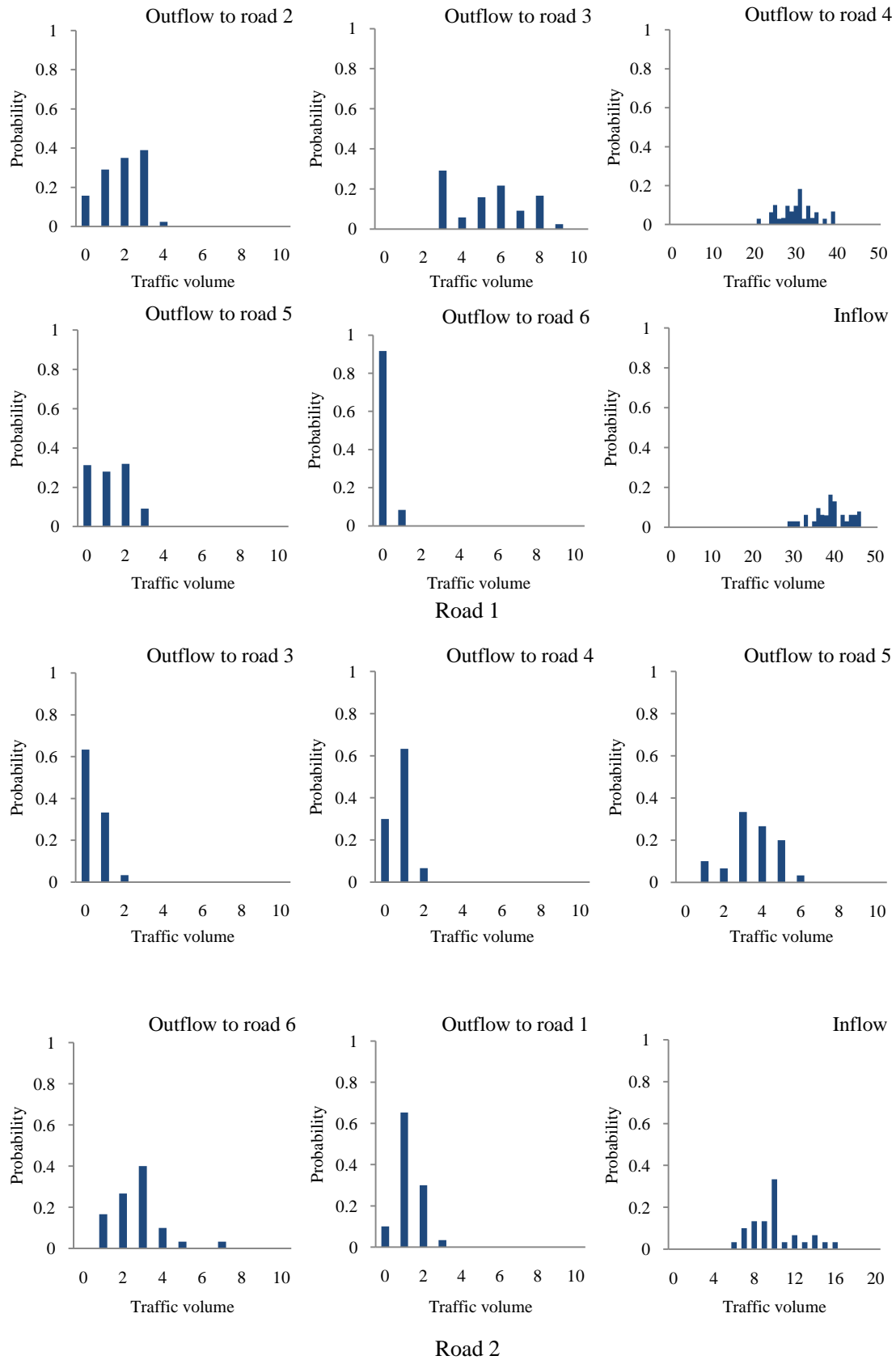


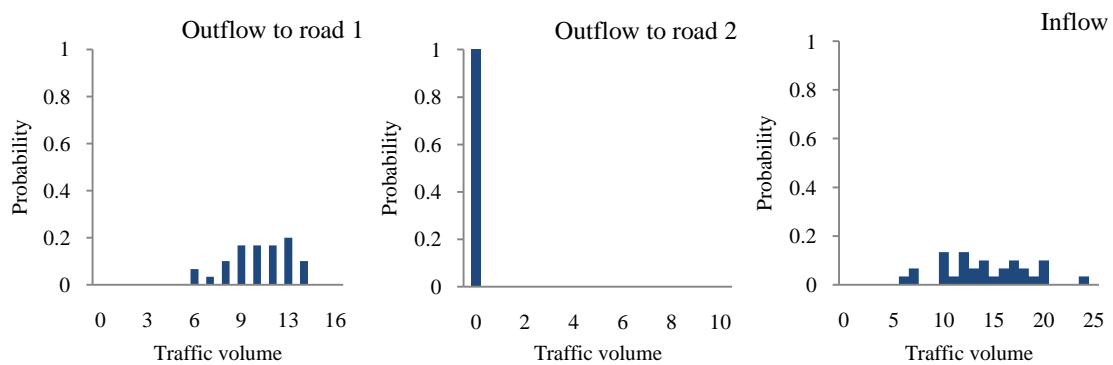
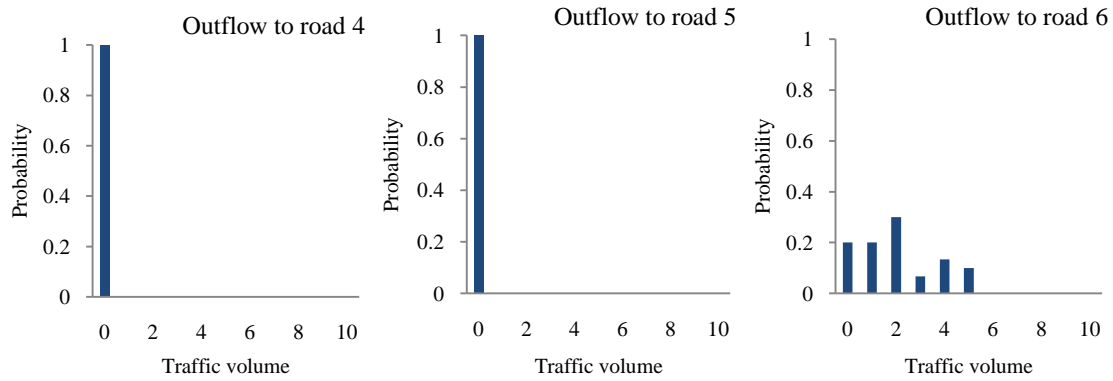


② 5th cycle

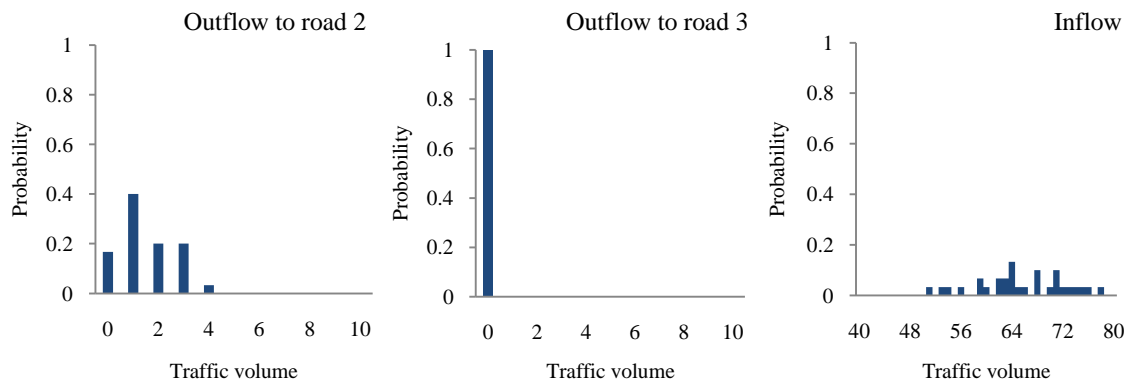
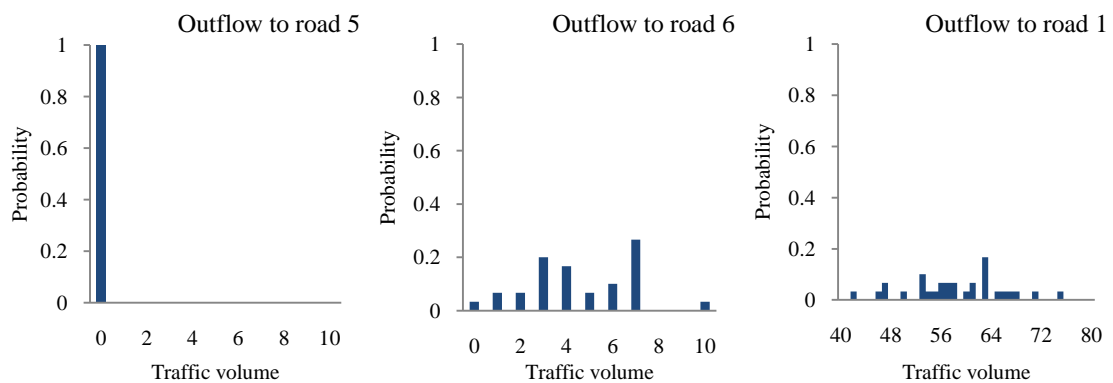


II. Priori probabilistic distributions of traffic inflow and outflow of each road at optimal signal

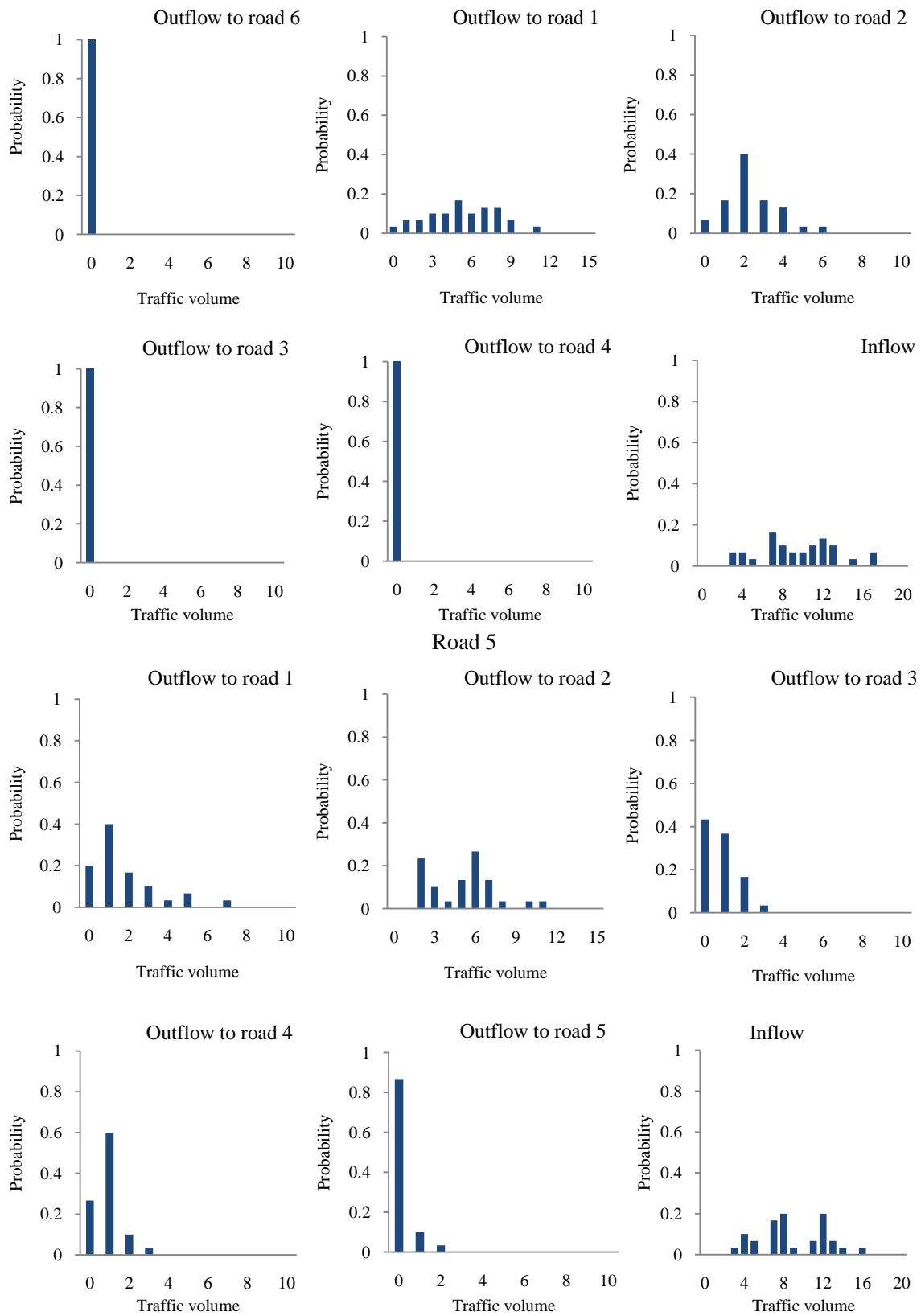




Road 3

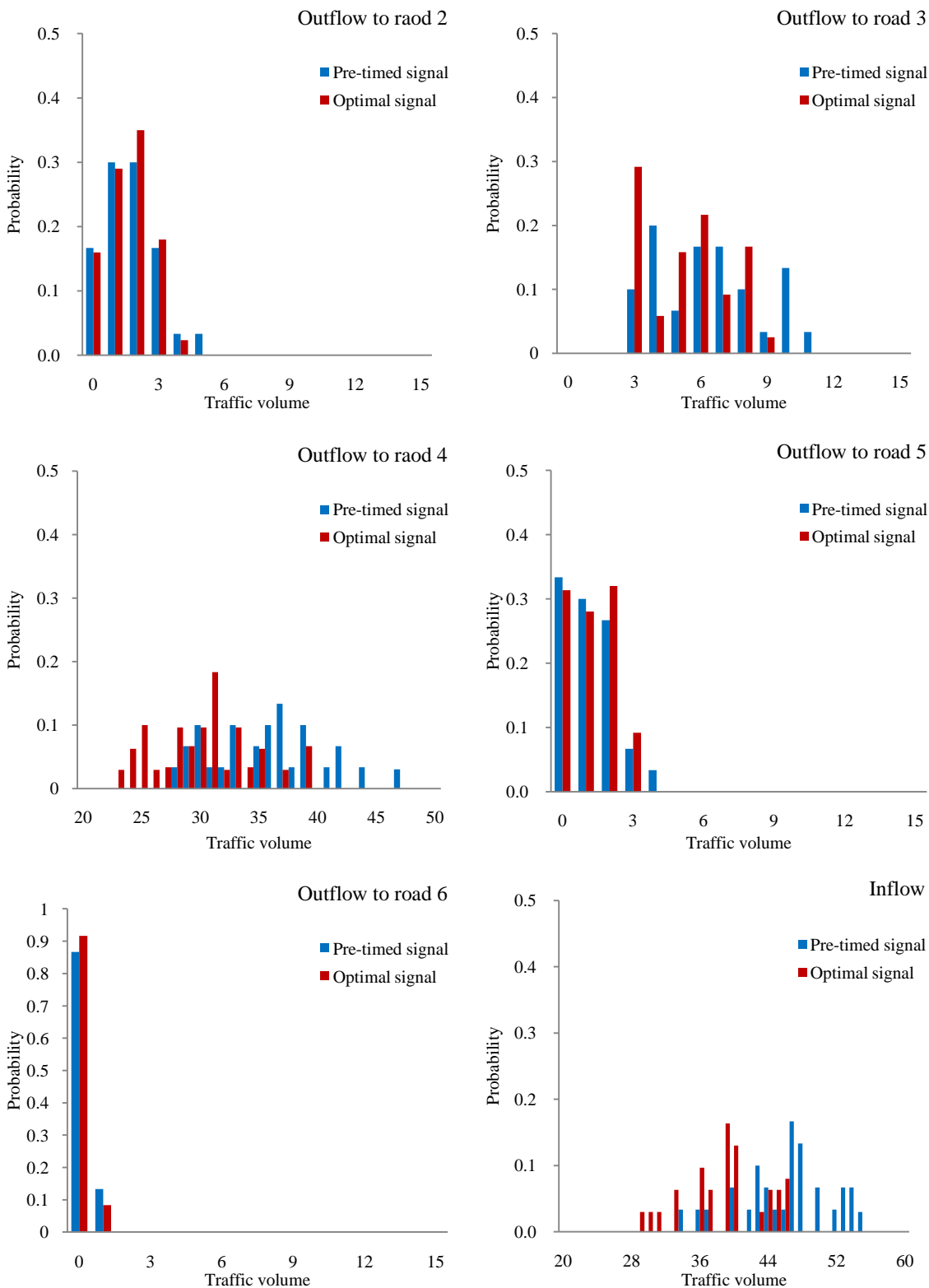


Road 4

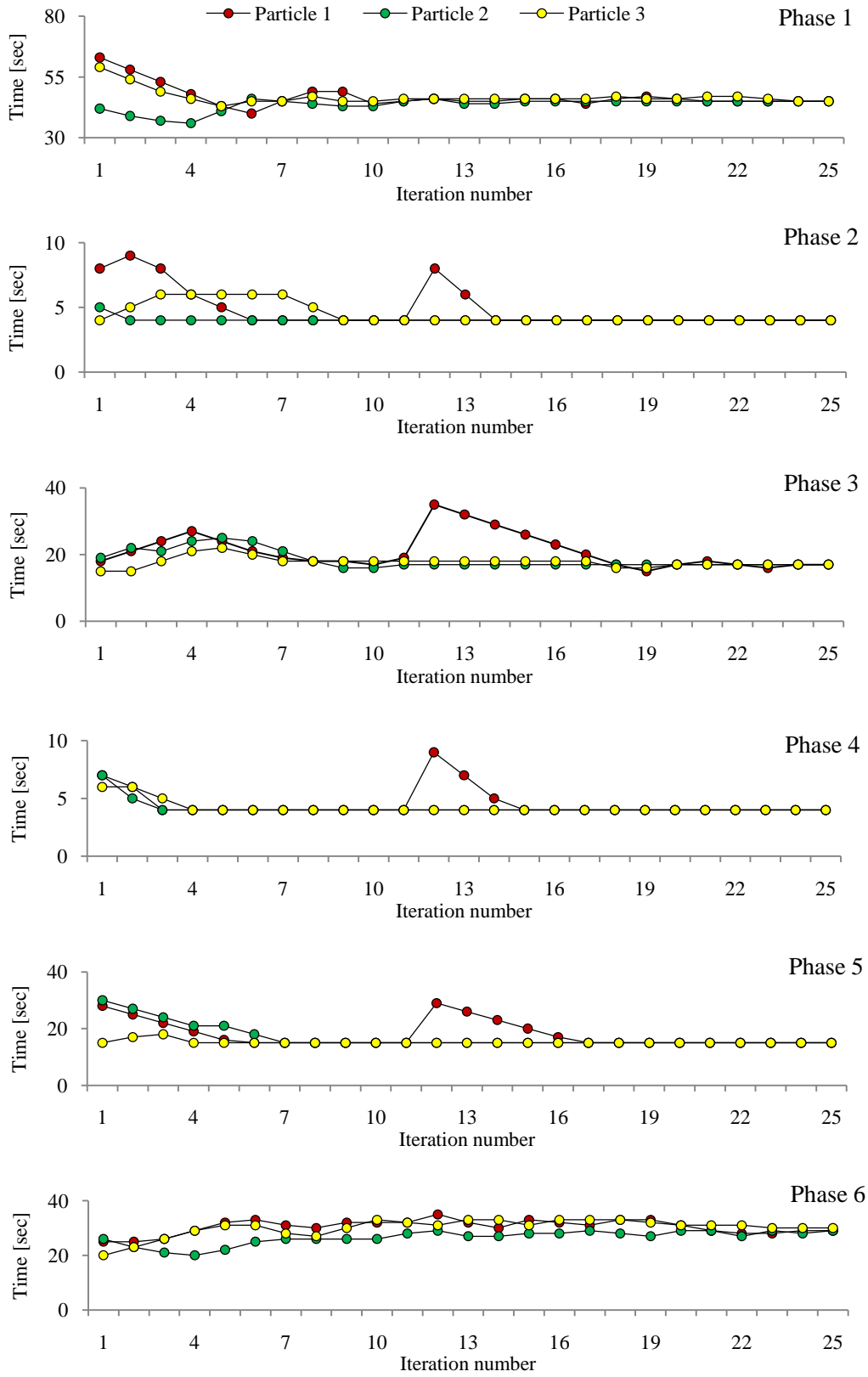


Road 6

III. Performance Index of each traffic signal control method



IV. Performance Index of each traffic signal control method



V. Performance Index of each traffic signal control method

1									
Method	Queue length [m]							Mean speed [km/h]	Mean delay time[sec]
	road 1	road 2	road 3	road 4	road 5	road 6	Total		
Pre-timed	134.1	296.6	282.4	157.4	78.7	84.1	1033.3	12.77	30.23
GA	123.3	250.6	285.8	138.7	82.6	73.4	954.4	13.53	28.51
LDIWM	123.4	253.2	279.4	140.3	90.2	66.3	952.7	13.89	27.40
CFM	122.4	257.0	234.2	140.0	83.0	65.5	902.0	13.87	27.53
H-PSO	122.3	259.9	253.7	138.3	89.2	68.4	931.8	13.77	27.83
H-GA-PSO	121.2	224.7	224.7	138.2	101.1	66.1	875.9	14.25	26.54
2									
Method	Queue length [m]							Mean speed [km/h]	Mean delay time[sec]
	road 1	road 2	road 3	road 4	road 5	road 6	Total		
Pre-timed	134.0	297.1	272.0	158.1	78.9	84.1	1024.1	12.77	30.23
GA	123.3	261.6	275.6	139.6	90.0	69.9	959.9	13.34	28.82
LDIWM	121.4	257.2	235.2	138.7	88.5	69.9	910.8	13.81	27.69
CFM	121.6	255.7	225.3	137.4	84.0	66.7	890.7	13.97	27.26
H-PSO	122.4	270.9	286.9	139.2	82.5	68.5	970.4	13.20	29.26
H-GA-PSO	119.0	211.3	228.1	136.9	106.3	65.5	867.0	14.33	26.38
3									
Method	Queue length [m]							Mean speed [km/h]	Mean delay time[sec]
	road 1	road 2	road 3	road 4	road 5	road 6	Total		
Pre-timed	134.3	299.1	273.7	158.7	78.7	84.1	1028.6	12.77	30.22
GA	123.3	255.2	282.7	140.4	82.5	69.2	953.4	13.35	28.84
LDIWM	122.9	253.7	245.9	140.1	88.4	72.0	923.0	13.82	27.66
CFM	120.7	246.2	229.2	138.9	106.2	72.9	914.1	13.71	27.84
H-PSO	123.1	257.8	282.7	139.6	81.3	65.2	949.7	13.49	28.58
H-GA-PSO	120.1	209.4	229.4	137.7	109.6	69.0	875.2	14.25	26.57
4									
Method	Queue length [m]							Mean speed [km/h]	Mean delay time[sec]
	road 1	road 2	road 3	road 4	road 5	road 6	Total		
Pre-timed	134.0	296.6	272.9	157.9	78.5	84.1	1024.0	12.84	30.08
GA	122.4	266.6	284.7	140.2	87.0	70.5	971.4	13.48	28.63
LDIWM	123.1	262.2	228.0	139.7	93.0	69.7	915.7	13.82	27.65
CFM	122.9	245.6	235.9	140.9	89.2	70.6	905.2	13.96	27.34
H-PSO	123.2	268.1	280.0	141.3	82.3	71.1	966.0	13.27	29.05
H-GA-PSO	120.6	234.6	230.2	136.4	94.9	68.7	885.3	14.22	26.66
5									
Method	Queue length [m]							Mean speed [km/h]	Mean delay time[sec]
	road 1	road 2	road 3	road 4	road 5	road 6	Total		
Pre-timed	134.0	297.8	282.7	157.9	78.5	84.1	1035.2	12.74	30.31
GA	125.3	252.5	294.6	144.2	84.4	80.0	981.0	13.26	29.18
LDIWM	123.1	261.5	230.0	139.9	98.4	72.8	925.6	13.76	27.84
CFM	121.0	258.2	231.3	139.5	91.8	69.2	910.9	13.71	27.89
H-PSO	123.4	252.3	266.3	140.0	87.6	70.1	939.7	13.57	28.23
H-GA-PSO	120.3	239.9	230.2	137.5	87.2	64.3	879.4	14.25	26.63